

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Yury Ryzhov

Studijní program:

N0713A060003 Elektroenergetika

Téma:

Návrh metodiky stanovení odpovídajícího modelu trojvinut'ových autotransfómát'orů dle typu konstrukce pro výpočty chodu sítě a zkratů
Design of a Methodology for Determining the corresponding Model of three-winding Autotransformers according to the Type of Construction for Calculations of network Operation and Short Circuits

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište rozdělení trojvinut'ových autotransfómát'orů podle konstrukce, srovnejte výhody a nevýhody.
2. Navrhněte metodiku tvorby modelu autotransfómát'oru podle zkušeností se stávajícími modely v různých programech.
3. Sestavte zjednodušené modely sítě s autotransfómát'ory v několika výpočtových programech.
4. Vypočtěte a srovnejte ustálený stav dané sítě ve vybraných programech.
5. Řešte zkrat v této síti a výsledky opět porovnejte.

Seznam doporučené odborné literatury:

Materiály a data poskytnutá ČEPS, a.s.

Dokumentace a instalace programu EMTP-ATP

HEŘMAN, Josef a kol. Příručka silnopr'oude elektrotechniky. Praha: SNTL, 1984, 1032 s

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Veleslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Ostravě dne 19.04.2021

**Návrh metodiky stanovení odpovídajícího modelu
trojvinut'ových autotransformátorů dle typu konstrukce pro
výpočty chodu sítě a zkratů.**

Design of a Methodology for Determining the corresponding Model of three-
winding Autotransformers according to the Type of Construction for
Calculations of network Operation and Short Circuits

Yury Ryzhov

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Veleslav Mach

Ostrava, 2021

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá modelováním autotransformátorů. Nejprve jsou popsány vlastností autotransformátorů a, hlavně, jejich rozdělení dle typu konstrukce. Druhá část zahrnuje návrh metodiky modelování autotransformátorů v různých výpočtových softwarech. Můžeme zde najít simulace zkoušky nakrátko v softwarech EMTP-ATP, SIMULINK a ENERGY CS, ale také model autotransformátoru či měření netočivé složky. Je zde vysvětlena metodika modelování autotransformátorů a vztahy, sloužící k výpočtům náhradních impedancí. Druhá polovina této práce se zabývá praktickými výpočty. Nejprve je sestavené schéma sítí, obsahující trafostanice s nainstalovanými autotransformátory, a uveden výpočet ustáleného stavů ve vybraných softwarech. Poslední část práci obsahuje příklady výpočtu zkratových proudů v různých uzlů navedené síti.

Klíčová slova

Autotransformátor; měření nakrátko; náhradní impedance; zkrat; zkratový proud; sousledná složka; zpětná složka; netočivá složka; ustálený stav.

ABSTRACT

This master degree work deals with the modelling of autotransformers. Firstly, the behaviour of autotransformers and, mainly, their division according to the type of construction are described. In the next section there is a design of methods of modelling autotransformer in different softwares. Here you can find simulation of short-circuit test in softwares EMTP-ATP, SIMULINK and ENERGY CS, and the model of autotransformers or short-circuit by zero-sequence impedance experiment. The methodology of autotransformer modelling and relations which is used for calculations of substitute impedances is explained here. The second half of the work deals with practical experiments. Firstly, the model of electrical network, contained autotransformers. The next chapter describe calculation of steady state of network in selected softwares. The final part of the work contains examples of calculating short-circuit currents in different parts of network.

Key words

Autotransformer; short-test; substitute impedance; short-circuit; short-circuit current; positive sequence; negative sequence; zero sequence; steady state.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Věslavu Machovi, vedoucímu mé diplomové práce, za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval. Také bych chtěl poděkovat konzultantovi mé diplomové práce Ing. Jiřímu Majkusovi, který mi pomáhal svými připomínkami, radami i náměty při obtížích nebo otázkách, na které jsem při práci narazil.

OBSAH

SEZNÁM POUŽITÝCH ZKRÁTEK	4
SEZNÁM OBRÁZKŮ	7
SEZNÁM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 ROZDĚLENÍ TROJVINUŤOVÝCH AUTOTRANSFORMÁTORŮ PODLE KONSTRUKCE, JEJICH VÝHODY A NEVÝHODY	13
1.1 Základní pojmy	13
1.2 Použití Autotransformátorů	14
1.3 Provozní režimy AT	14
1.4 Výhody a nevýhody použití AT.	15
1.5 Rozdělení AT	16
1.5.1 Rozdělení AT dle počtu fází	16
1.5.2 Rozdělení AT podle konstrukce magnetického obvodu	17
1.5.3 Rozdělení AT dle umístění odbočkových závitů	19
2 METODIKA TVORBY MODELU AUTOTRANSFORMÁTORU V RŮZNÝCH PROGRAMECH	21
2.1 Model autotransformátoru	21
2.2 Sestavení vektorového diagramu AT.....	23
2.3 Model AT v netočivé soustavě.....	27
2.4 Modely AT v vybraných softwarech	32
2.4.1 Zadaní autotransformátoru v programu EMTP-ATP	32
2.4.2 Model autotransformátoru v programu SIMULINK	36
2.4.3 Model autotransformátoru v programu ENERGY	41
2.5 Měření nakrátko	43
2.5.1 Výběr schéma pro výzkum stavů nakrátko	44
2.5.2 Měření nakrátko v programu EMTP-ATP	45

2.5.3 Měření nakrátko v programu SIMULINK	46
2.5.4 Měření nakrátko v programu ENERGY	48
2.6 Měření nulové impedance autotransformátorů	50
3. SESTAVENÍ ZJEDNODUŠENÉHO MODELU SÍTĚ S AUTOTRANSFORMÁTORY	54
3.1 Popis schématu	54
3.1.1 Určení velikostí odběrů	55
3.1.2 Transformátory v elektrizační soustavě	55
3.1.3 Popis venkovních vedení	56
3.2 Výpočet nahradních parametrů schématu	56
4 VÝPOČET USTÁLENÉHO STAVU DANÉ SÍTĚ	64
4.1 Ruční výpočet ustáleného stavu dané sítě	64
4.2 Výpočet ustáleného stavu v programu ENERGY UR	68
4.3 Výpočet ustáleného stavu v programu SIMULINK	72
4.4 Výpočet ustáleného stavu v programu EMTP-ATP	78
5. ŘEŠENÍ ZKRATŮ V DÁNE SÍTĚ	83
5.1 Výpočet zkratů pomocí softwaru ENERGY TKZ	83
5.2 Výpočet zkratů pomocí softwaru EMTP-ATP	84
5.3 Výpočet zkratů pomocí softwaru SIMULINK.	87
ZÁVĚR	92
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	93

SEZNÁM POUŽITÝCH ZKRÁTEK

AT – autotransformátor

U_1, U_H - napětí primárního vinutí

U_2, U_L - napětí sekundárního vinutí

ΔU - napětí na galvanické spojeném vinutí AT

ΔI – proud, protékající ve společné části vinutí

VN – vysoké napětí

HV – primární vinutí

LV – sekundární vinutí

TV – terciální vinutí

VVN – velmi vysoké napětí

NN – nízké napětí

LATR – laboratorní autotransformátor

Y – spojení vinutí transformátoru do hvězdy

Y_0 – spojení vinutí transformátoru do hvězdy s uzemněním

D – spojení vinutí transformátoru do trojúhelníku

R_w – odpor vinutí

ω - úhlová frekvence

f – frekvence sítě

Z_i – náhradní impedance prvku

$Z_{(1)}$ – náhradní impedance sousledné složky

$Z_{(2)}$ – náhradní impedance zpětné složky

$Z_{(0)}$ – náhradní impedance netočivé složky

U_N – napětí v nulovém vodiči

X'_H, X'_L, X'_T - reaktance vinutí AT v netočivé soustavě

$X'_{H-L}, X'_{H-T}, X'_{L-T}$ - reaktance spojených do trojúhelníku vinutí AT v netočivé soustavě

X_N - reaktance nulového vodiče

I_N – proud v nulovém vodiči

U, V, W – vývody autotransformátoru

$I''_k(3f)$ – třífázový zkratový proud v napájecí soustavě

$I''_k(1f)$ – jednofázový zkratový proud v napájecí soustavě

P_i – činný výkon

Q_i – jalový výkon

S_i – zdánlivý výkon

$\cos\phi$ – výkonový činitel

C_{max} – napěťový činitel

U_n – jmenovité napětí

S_n – jmenovitý výkon

ΔQ_x – jalové ztráty naprázdno

I_0 – proud naprázdno

P_0 – činné ztráty naprázdno

u_{kr} – napětí nakrátko

P_{kr} – ztráty činného výkonu nakrátko

L – délka vedení

I_{max} – maximální dovolený proud vedením

U_v – vztažné napětí

S_v – vztažný výkon

I_v – vztažný proud

Z_v – vztažná impedance

S_z – zkratový výkon v místě napájení

Y, G, B – vodivost vedení

ΔP_k – ztráty na korunu

R_0, X_M – parametry magnetického obvodu AT

Q_c – nabíjecí výkon vedení

ΔS – ztráty výkonu

$I_{K3}(10)$ – proud třífázového zkratu na straně 10 kV

$I_{K3}(110)$ – proud třífázového zkratu na straně 110 kV

$I_{K1}(110)$ – proud jednofázového zkratu na straně 110 kV

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Spojení primárního a sekundárního vinutí autotransformátoru	13
Obrázek 1.2 Schéma třífázového autotransformátoru s hvězdicovým spojením fází vinutí s odstraněným neutrálním bodem	16
Obrázek 1.3 Tvar jádra magnetického obvodu se třemi sloupky	18
Obrázek 1.4 Tvar jádra magnetického obvodu s pěti sloupky	18
Obrázek 1.5 Trojfázový plášťový magnetický obvod se sedmi sloupky	19
Obrázek 1.6 Odbočkové závity u společného středního bodu	19
Obrázek 1.7 Odbočkové závity u svorky X na straně středního napětí	20
Obrázek 2.1 Náhradní schéma trojvinového AT, spojené do třipaprskové hvězdy	21
Obrázek 2.2 Model AT - a – stav naprázdno, b - režim zatížení	24
Obrázek 2.3 Vektorový diagram AT	27
Obrázek 2.4 Náhradní schéma AT se dvěma vinutí.....	28
Obrázek 2.5 Náhradní schéma AT se třemi vinutí	28
Obrázek 2.6 Náhradní schéma AT s dvěma vinutí a uzemněným přes reaktance nulovým vodičem...	29
Obrázek 2.7 Náhradní schéma AT s třemi vinutí a uzemněným přes reaktance nulovým vodičem	29
Obrázek 2.8 Náhradní schéma AT s třemi vinutí a izolovaným nulovým vodičem při spojení do trojúhelníku	30
Obrázek 2.9 Protékání proudů nulovým vodičem	31
Obrázek 2.10 Nulová složka magnetizace jader se třemi a pěti sloupky	31
Obrázek 2.11 Závislost nulové složky magnetizační impedance transformátoru s třemi sloupky	32
Obrázek 2.12 Náhradní schéma modelu HYBRID v programu EMTP-ATP	33
Obrázek 2.13 Model autotransformátoru s 5 sloupky v programu EMTP-ATP	35
Obrázek 2.14 Nastavení parametry modelu HYBRID TRANSFORMER	35
Obrázek 2.15 Náhradní model bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK	37

Obrázek 2.16 Okno „Configuration“ bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK	39
Obrázek 2.17 Okno „parameters“ bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK	40
Obrázek 2.18 Tabulka zadávání parametrů AT v programu ENERGY CS	41
Obrázek. 2.19 Schéma zapojení AT pro měření nakrátko	43
Obrázek. 2.20 Zvolená schéma pro měření nakrátko	44
Obrázek 2.21 Zapojení nakrátko vinutí HV a LV v programu EMTP-ATP	45
Obrázek 2. 22 Zadání parametrů AT v programu EMTP-ATP	46
Obrázek 2.23 Zapojení nakrátko vinutí HV a LV v programu SIMULINK	47
Obrázek 2.24 Zadání parametrů AT v programu ENERGY CS	49
Obrázek 2.25 Zapojení nakrátko vinutí HV a LV v programu ENERGY CS	49
Obrázek 2.26 Obvod ekvivalentní nulové sekvence autotransformátoru	51
Obrázek 2.27 Průběh proudů netočivé soustavy v trojúhelníku	51
Obrázek 2.28 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí HV a TV	52
Obrázek 2.29 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí HV a LV	52
Obrázek 2.30 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí LV a TV	53
Obrázek 3.1 Schéma navržené sítě pro výpočty ústaleného stavu a zkrátových proudů	54
Obrázek 3.2 Náhradní schéma navržené sítě	57
Obrázek 3.3 Náhradní schéma napájecího uzlu	57
Obrázek 3.4 Náhradní schéma vedení	58
Obrázek 3.5 Náhradní schéma odběru	60
Obrázek 3.6 Náhradní schéma AT	61
Obrázek 3.7 Náhradní schéma dvojvinutového transformátoru	63
Obrázek 4.1 Náhradní schéma úseku 1-2	64
Obrázek 4.2 Náhradní schéma úseku N-1	66
Obrázek 4.3 Zadání parametrů vodičů v programu ENERGY	68

Obrázek 4.4 Zadání parametrů T2 v programu ENERGY	69
Obrázek 4.5 Zadání odběrných míst v programu ENERGY	70
Obrázek 4.6 Modelování vedení v programu ENERGY	70
Obrázek 4.7 Zadání parametrů napájecí soustavy v programu ENERGY	71
Obrázek 4.8 Výpočet ustáleného stavu v programu ENERGY UR	71
Obrázek 4.9 Zadání parametrů napájecí soustavy v programu SIMULINK	72
Obrázek 4.10 Zadání parametrů napájecí soustavy v programu SIMULINK	73
Obrázek 4.11 Zadání parametrů vedení 220 kV v programu SIMULINK	73
Obrázek 4.12 Zadání parametrů vedení 110 kV v programu SIMULINK	74
Obrázek 4.13 Zadávání parametrů odběrného místa 1 v programu SIMULINK	74
Obrázek 4.14 Zadávání parametrů odběrného místa 2 v programu SIMULINK	75
Obrázek 4.15 Zadávání parametrů odběrného místa 3 v programu SIMULINK	75
Obrázek 4.16 Zadávání parametrů dvojvinutového transformátoru v programu SIMULINK	76
Obrázek 4.17 Symbolické označení měřících bloků v programu SIMULINK	76
Obrázek 4.18 Výpočet ustáleného stavu v programu SIMULINK	77
Obrázek 4.19 Zadání T2 v programu EMTP-ATP	78
Obrázek 4.20 Zadání odběrového místa 1 v programu EMTP-ATP	79
Obrázek 4.21 Zadání odběrového místa 2 v programu EMTP-ATP	79
Obrázek 4.22 Zadání odběrového místa 3 v programu EMTP-ATP	80
Obrázek 4.23 Zadání napájecí soustavy v programu EMTP-ATP	80
Obrázek 4.24 Zadání impedanci napájecí soustavy v programu EMTP-ATP	81
Obrázek 4.25 Zadání parametrů vedení 110 kV v programu EMTP-ATP	81
Obrázek 4.26 Zadání parametrů vedení 220 kV v programu EMTP-ATP	81

Obrázek 4.27 Výpočet ustáleného stavu v programu EMTP-ATP	82
Obrázek 5.1 Výpočet třífázového zkratu na straně TV v programu ENERGY CS	84
Obrázek 5.2 Výpočet zkratů na straně LV v programu ENERGY CS	84
Obrázek 5.3 Blok pro modulace třífázového zkratu v programu EMTP-ATP	85
Obrázek 5.4 Výpočet třífázového zkratu na straně TV v programu EMTP-ATP	85
Obrázek 5.5 Výpočet třífázového zkratu na straně LV v programu EMTP-ATP.....	85
Obrázek 5.6 Použité bloky pro simulaci jednofázového zkratu v programu EMTP-ATP	86
Obrázek 5.7 Zadání parametrů vedení V1 pro souslednou a netočivou soustavy	86
Obrázek 5.8 Zadání parametrů vedení V2 pro souslednou a netočivou soustavy	86
Obrázek 5.9 Výpočet jednofázového zkratu na straně LV v programu EMTP-ATP	87
Obrázek 5.10 Model prvku „3 – Phase-Fault“ v programu SIMULINK	87
Obrázek 5.11 Výpočet třífázového zkratu na straně TV v programu SIMULINK	88
Obrázek 5.12 Výpočet třífázového zkratu na straně LV v programu SIMULINK	89
Obrázek 5.13 Výpočet jednofázového zkratu na straně LV v programu SIMULINK	90

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Parametry autotransformátorů, zvoleného pro měření nakrátko	44
Tabulka 2.2 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu EMTP-ATP	46
Tabulka 2.3 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu SIMULINK	48
Tabulka 2.4 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu ENERGY CS	49
Tabulka 2.5 Porovnání výsledků měření ve vybraných programech	50
Tabulka 3.1 Parametry napáječe	54
Tabulka 3.2 Parametry spotřeby	55
Tabulka 3.3 Parametry autotransformátorů	55
Tabulka 3.4 Parametry transformátoru	56
Tabulka 3.5 Parametry venkovních vedení	56
Tabulka 3.6 Nahradní parametry vedení	59
Tabulka 3.7 Nahradní parametry spotřeby	60
Tabulka 4.1 Výsledky ručního výpočtu ustáleného stavu	68
Tabulka 4.2 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu ENEGRY UR	71
Tabulka 4.3 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu SIMULINK	78
Tabulka 4.4 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu EMTP-ATP	82
Tabulka 4.5 Porovnání výpočtů ustáleného stavu ve vybraných programech.....	82
Tabulka 5.1 Výsledky výpočtu zkratových proudů ve vybraných programech	91

ÚVOD

Tématem mé diplomové práce jsou autotransformátory a jejich modelování. Toto téma je pro energetiku velmi důležité z důvodu, že autotransformátor je moderní a jedné z nejdůležitějších zařízení energetické soustavy. Modelování v energetice je také jednou z nedůležitých věcí, která umožňuje provedení spousta měření a hodně zlevňuje náklady na výzkum či projektování sítě.

V první části této práce se věnuje autotransformátorům, jako takovým. Uvádím zde vlastnosti autotransformátorů, podmínky provozu a jejich rozdělení. Autotransformátory lze rozdělit podle několika parametrů:

- Konstrukce magnetického obvodu
- Počet fází
- Umístění odbočkových závitů

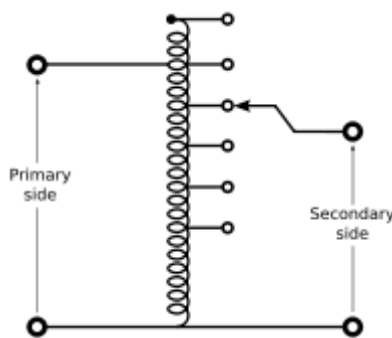
V druhé části vysvětluji metodika modelování autotransformátorů v různých softwarech. Pro sestavení modelů byli použity softwary, kteří se používají v Evropě, USA a Rusku. Pomocí těchto softwarů byli vypočteny zkratové proudy, vznikající při měření nakrátko. Pomocí těchto výpočtu je možné zjistit správné nastavení ochran proti zkratů, aby maximálním zkratovým proudům odolaly. Autotransformátory jsou jedním z nejdražších zařízení v elektrizační soustavě, a proto jejich chránění je na důležitém místě.

V druhé polovině práce se zaměřuji na výpočty chodu sítě, s nainstalovanými do ní autotransformátory. V třetí a čtvrté části se zabývá sestavením náhradního schéma, a výpočtem ustáleného stavu, ve kterém síť je v provozu. Co se týká poslední částí, tam se zabývám výpočty zkratů v různých bodech soustavy (jedná se o výpočty trojfázových zkratů na stranách TV a LV autotransformátorů a také jednofázového zkratu na straně 110 kV).

1 ROZDĚLENÍ TROJVINUŤOVÝCH AUTOTRANSFORMÁTORŮ PODLE KONSTRUKCE, JEJICH VÝHODY A NEVÝHODY

1.1 Základní pojmy

Autotransformátor je transformátor, dva nebo více jejichž vinutí jsou galvanicky spojena tak, aby měla společnou část. Vinutí AT jsou elektricky a magneticky spojena a přenos energie z primárního obvodu do sekundárního probíhá jak magnetickým polem, tak elektricky. V transformátoru je veškerá energie transformována z primární energie do sekundární, zatímco v AT pouze část celkové energie se transformuje a druhá část se přenáší přímo z jednoho systému napětí do jiného systému napětí bez transformace. [10]



Obrázek 1.1 Spojení primárního a sekundárního vinutí autotransformátoru. [5]

V AT se část primárního vinutí používá jako sekundární, což umožňuje snížit napětí v sekundárním vinutí na U_2 . V tomto případě zahrnuje část primárního vinutí do sebe sekundární a přídavná část s menším napětím:

$$\Delta U = U_1 - U_2;$$

Rozdílem je dán i proud ΔI protékající ve společné části vinutí.

$$\Delta I = I_2 - I_1;$$

Společná část vinutí může být, proto vyrobena z drátu menšího průřezu, určeného pro rozdíl proudů místo celkového proudu I_2 .

Pro srovnání transformátorů a autotransformátorů jsou přijímány koncepty jako „Propustný“ a „typický“ výkon.

Propustný výkon je výkon přenášený AT do sekundární sítě, typický výkon je výkon transformátoru se dvěma vinutími, který má parametry tohoto AT. Čím vyšší je transformační poměr, tím vyšší výhody je dosaženo s AT. [10]

1.2 Použití Autotransformátorů

Při rozvoje elektroenergetiky a elektrotechniky v XX století se autotransformátory nejrozšířeněji používaly v SSSR, například pro manuální stabilizaci napájecího napětí byla trubková televize připojena k síti prostřednictvím autotransformátorů typu LATR a před zapnutím samotné televize, napětí bylo ručně upraveno na jmenovitou hodnotu. Důvodem bylo to, že energetické sítě často pravidelně pociťovaly přepětí nebo podpětí, které by mohlo poškodit drahé televize, a dokonce vést k požáru. V současné době autotransformátory malých výkonů se používají v telefonech, radiotechnických zařízeních, pro napájení usměrňovačů atd.

Co se týče sítě VN, tady se používají AT v sítích s uzemněním, což o několikrát zlevňuje náklady na stavbu při stejných technických podmínkách. Oni našli uplatnění při spojení přenosových a distribučních sítí, při napájení velkého počtu spotřebičů na rozvodnách a na rozvodnách, kteří pracují více než na 2 hladinách napětí. Nejvýhodnější je použití autotransformátorů při spojení přenosových a distribučních sítí, avšak na napětí minimálně 220 kV. Taky, existuje zákaz použití autotransformátorů v izolovaných sítích. To je způsobeno skutečností, že při absenci neutrálního uzemnění a zemního spojení jedné fáze v síti s vyšším napětím vzroste napětí ostatních dvou fází středního napětí vzhledem k zemi na nepřijatelnou hodnotu. [10]

1.3 Provozní režimy AT

AT se vyznačuje následujícími hlavními provozními režimy:

1. Režimy HV – LV a LV – TV jsou pouze režimy autotransformátoru. V těchto režimech je možné předat jenom kompletní jmenovitý výkon AT.

2. Režimy HV – TV a TV – HV jsou pouze transformační a umožňují přenos výkonu rovného výkonu, přenášeného vinutím TV.

3. Režimy LV – TV a TV – LV jsou také transformátorové a umožňují přenášet výkon rovný výkonu vinutí TV.

4. Kombinované režimy transformátoru a autotransformátoru HV – TV a současně HV – TV, stejně jako LV – TV a současně TV – HV. Pokud není na straně TV žádné zatížení, pak tyto režimy přejdou do autotransformátoru HV– LV a LV – HV. S nárůstem zatížení ve vinutí TV se musí odpovídajícím způsobem snížit výkon na straně LV, aby nedošlo k přetížení sériového vinutí.

Přetížení trojvinut'ového AT je určena proudem nejvíce zatíženého vinutí a jsou sledovány lineární proudy i proud společného vinutí.

Zatížení společného vinutí je definováno jako poměr skutečného proudu k jeho nejvyššímu dlouhodobému přípustnému proudu uvedenému ve štítkových údajích

1.4 Výhody a nevýhody použití AT

Hlavním důvodem použití je zvýšená účinnost AT. Kvůli spojenému vynutí odpor AT je menší než u obyčejných transformátorů stejného výkonu, což předpokládá nižší ztráty činného výkonu. Použití AT v sítích VVN snižuje celkové ztráty o 20-30 % [11]

Další výhodou AT je menší váha a rozměry. Spojené vynutí potřebuje méně metalů, což je levnější. Také jde o jednoduchost přepravy a instalování na místě. [11]

Také, autotransformátory mají menší úbytek napětí na vynutí. Jde o možnost lepší regulace a dodržování norem na odchylky napětí. [11]

Hlavní nevýhodou autotransformátorů je galvanické spojení vynutí. Kvůli tomu musí být zvyšovaná izolace mezi vynutím a nádobou transformátoru, která má vydržet napětí primárního vinutí. Také existuje riziko nasazení vyššího napětí na straně nižšího. Proto všechny autotransformátory musí mít uzemnění při spojení vynutí vyššího napětí v hvězdu. [11]

Je třeba říct, že u trojminutových AT neexistuje možnost regulace napětí na nižší straně. Je možné nainstalovat regulátory jen na jedné ze stran, a nejefektivnější je instalace regulátoru na středním napětí, čím dochází k snížení izolace a zlevnění zařízení. Regulace napětí na straně NN je určena pomocí jiných strojů, například posilovači, kteří mění napětí pouze v rámci jedné hladiny napětí. [11]

Galvanické spojení primární a sekundární stran taky omezuje provoz autotransformátoru v sítích 6-10 kV. Z bezpečnostních důvodů je zakázáno používat autotransformátory při napájení do těchto sítí spotřebičů, pracujících na hladině 380/220 V. Autotransformátory nemají dostatečné podmínky pro bezpečný provoz v sítích NN, a jejich použitím může dojít k smrti lidí, pracujících na napájeném zařízení. [11]

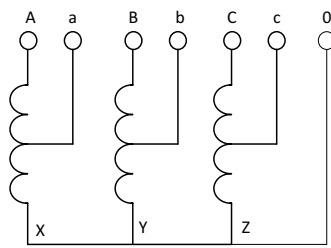
Při projektování taky musíme počítat s tím, že autotransformátory mají sníženou reaktanci a zkratový odpor, což zvyšuje velikost zkratových proudů. Proto z bezpečnostních podmínek, autotransformátory nesmí pracovat bez uzemnění a je nutné dávat na to pozor při nastavení ochrany AT. [11]

1.4 Rozdělení AT

1.4.1 Rozdělení AT dle počtu fází

Třífázové autotransformátory

U třífázových autotransformátorů jsou fáze obvykle spojeny ve hvězdě se staženým neutrálním bodem (obr. 1.2). Pokud je nutné snížit napětí, dodává se elektrická energie na svorky A, B, C a odebírá se ze svorek a, b, c, a když napětí stoupá, naopak. Používají se jako zařízení ke snižování napětí při spouštění výkonných motorů, stejně jako k postupné regulaci napětí na svorkách topných článků elektrických pecí. [10]



Obrázek 1.2 Schéma třífázového autotransformátoru s hvězdicovým spojením fází vinutí s odstraněným neutrálním bodem

Třífázové transformátory vysokého napětí se třemi vinutími se také používají ve vysokonapěťových elektrických sítích.

Třífázové autotransformátory jsou zpravidla zapojeny do hvězdy s neutrálním vodičem na straně vyššího napětí. Spojení do hvězdy zajišťuje úbytek napětí, pro který je navržena izolace autotransformátoru.

Jednofázové autotransformátory

Pro zvýšení kapacity jednotkového AT a také s ohledem na rozměry a hmotnosti během přepravy od výrobce k elektrárnám nebo rozvodnám jsou vysokonapěťové a výkonné AT často vyráběny jednofázově, aby z nich tvořily třífázovou skupinu.

Jednofázové AT tvořící třífázovou skupinu jsou zpravidla připojeny podle schématu Yo/D, to znamená, že skupina má hvězdné spojení ze strany VN s vyvedeným nulovým bodem a ze strany NN – do trojúhelníku. Pro zlepšení spolehlivosti provozu sítě každou třífázovou skupinu se musí vytvářet 4 jednofázových transformátorů. Poslední z nich se nachází ve stavu studené rezervy a při vzniku poruchy, automatika připojuje jeho na místo poškozeného AT. Matematická model jednofázových výkonových transformátoru je shodná s trojfázovým AT.

Jádro magnetického obvodu s pěti sloupky (viz obrázek 1.4) má tři sloupky s vinutími a dva nenavinuté postranní sloupky s menším průřezem. Spojky spojující všech pět sloupků mají rovněž v porovnání s vinutými sloupky průřezy menší.

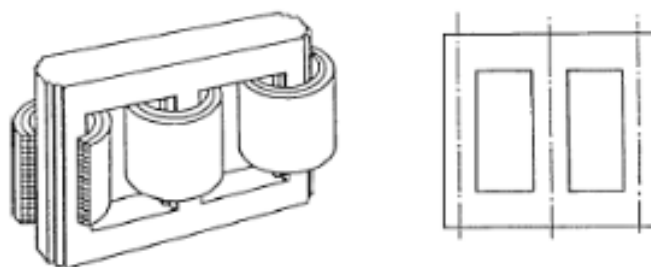
1.4.2 Rozdělení AT podle konstrukce magnetického obvodu

Hlavní rozdíl mezi konstrukcemi, spočívá v jejich chování při napojení na nesouměrný systém napětí majících nenulový součet, tj. majících nulovou složku.

Tato podmínka může být také popsána jako vyplývající z nulové složky proudu bez vyrovnávajících ampér-závitů v některém jiném vinutí. Takový proud je magnetizačním proudem pro magnetický obvod ale omezen magnetizační impedancí, na niž se vytváří nulová složka napětí.

Magnetický obvod se třemi spojkami

Nejobvyklejší konstrukci magnetického obvodu pro trojfázový transformátor je tvar jádra se třemi sloupky, kteří spojeny nahoře a dole horizontálními spojkami. [10]



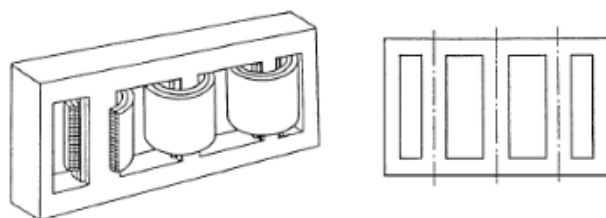
Obrázek 1.3 Tvar jádra magnetického obvodu se třemi sloupkami [10]

V jádrovém transformátoru se třemi sloupkami se sousledná a zpětná složka toku ve sloupcích s vinutím ruší přes spojky. Vnější rozptylový tok spojek má velkou reluktanci a pro danou velikost toku vyžaduje značnou magnetu-motorickou sílu. Ten jev představuje poměrně malou magnetizační nulovou impedanci, která se mění nelineárně z velikosti nulové složky. [10]

Naopak nekompenzovaná nulová složka proudu je magnetizačním proudem, který je omezen nulovou magnetizační impedancí. Výsledkem je superponovaná nesouměrnost napětí fáze – střední bod, nulová složka napětí. Nulová složka rozptylového toku ve spojkách indukuje přídatné vířivé proudy ve stahovací konstrukci a nádobě, které vyvolávají v těchto částech dodatečné parazitní ztráty. Mohou také vznikat zvýšené přídatné ztráty ve vinutí způsobené abnormálním parazitním tokem.

Magnetický obvod se pěti spojkami

Magnetické obvody jsou oddělené a nezávislé na jakémkoli přiloženém provozním napětí. Následkem jevu popsaného výše je obvyklé vybavení těchto transformátorů nebo transformátorových souprav stabilizačním vinutím spojeným do trojúhelníku. [10]

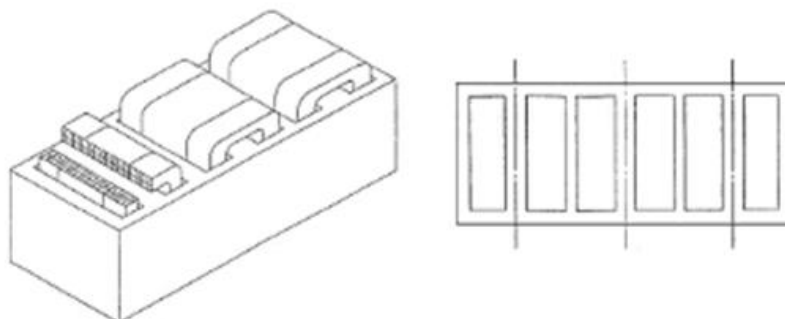


Obrázek 1.4 Tvar jádra magnetického obvodu s pěti sloupkami [10]

V transformátoru s pěti sloupkami nebo v plášťovém transformátoru je vytvořena zpětná cesta pro nulovou složku toku částmi magnetického obvodu bez vinutí. Nulová složka toku má malou magnetickou reluktanci rovnocennou velké magnetizační impedanci podobné impedanci normální sousledné složky napětí. To platí do mezí, kdy části magnetického obvodu bez vinutí dosáhnou nasycení. Po překročení mezí impedance klesá a způsobuje špičatý zkreslený proud.

Magnetický obvod se sedmi spojky

Nový trojfázový magnetický obvod má sedm sloupků, v nichž jsou vinuté sloupky orientovány různým způsobem.



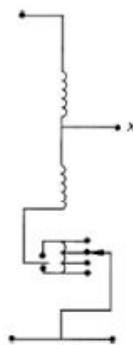
Obrázek 1.5 Trojfázový plášťový magnetický obvod se sedmi sloupky [10]

1.4.3 Rozdělení AT dle umístění odbočkových závitů.

Změna převodu napětí v autotransfornátorech se provádí různými způsoby, které se řídí principy uvedenými dle normy IEC 60076-1, jiné však nikoliv, protože počet účinných závitů je měněn v obou vinutích zároveň.

Odbočkové závity jsou buď u společného středního bodu nebo na straně středního napětí.

Odbočkové závity u společného středního bodu



Obrázek 1.6 Odbočkové závity u společného středního bodu [10]

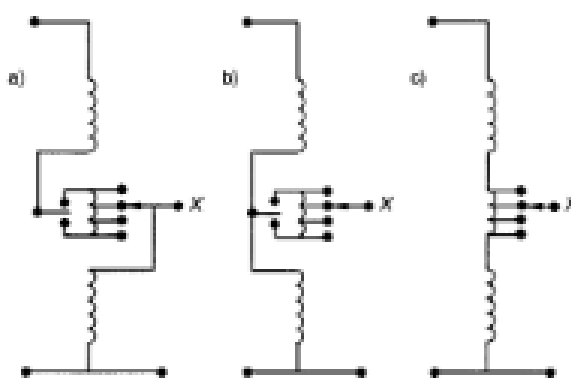
Řízení napětí ve středním bodu zvyšuje nebo snižuje počet závitů zároveň ve vinutích vyššího i nižšího napětí. Tento typ řízení je neúčinný, protože vyžaduje více řízených závitů pro předepsaný rozsah změny převodu. Proto se v autotransfornátorech značně mění napětí na závit

podél odbočkového rozsahu. Jev je tím výraznější, čím více se převod transformátoru blíží jedné. [10]

Zřejmou předností řízení ve středním bodě je to, že odbočkové vinutí a přepínač odboček jsou blízko potenciálu středního bodu a vyžadují nízkou izolační hladinu k zemi.

Odbočkové závity u svorky X na straně středního napětí

Řízení, uspořádané v místě propojení vinutí autotransformátoru vyžaduje, aby byla odbočková vinutí a přepínač odboček konstruovány s izolační hladinou svorky X. Jsou přímo vystaveny přechodným napětím se strmým čelem atmosférických a spínacích přepětí.



Obrázek 1.7 Odbočkové závity u svorky X na straně středního napětí [10]

a) Počet závitů ve společném vinutí zůstává nezměněn. Je to logická volba, když v soustavě nižšího napětí zůstává napětí poměrně stálé, zatímco je napětí v soustavě vyššího napětí více proměnlivé. [10]

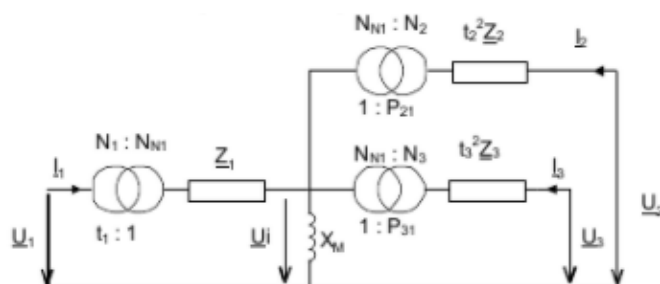
b) Tato možnost je opačná možnosti „a“. Počet závitů ze strany vyššího napětí zůstává konstantní, zatímco se mění účinný počet závitů ze strany nižšího napětí. Umožňuje použití kladného nebo záporného odbočkového vinutí jeho obrácením. [10]

c) Počet závitů je konstantní na straně vyššího napětí. Pro předepsaný počet připojených závitů se poměr mění více než v případě „b“. [10]

2 METODIKA TVORBY MODELU AUTOTRANSFORMÁTORU V RŮZNÝCH PROGRAMECH

2.1 Model autotransformátoru

Model autotransformátoru je shodný s modelem trojvinut'ového transformátoru a jeho náhradní schéma můžeme znázornit jako třípáskovou hvězdu. Takové uspořádání vinutí předpokládá, že jednotlivé rozptylové spřažené magnetické toky Ψ_i neprotínají ostatní vinutí. Bez tohoto předpokladu je odvození rovnic mnohem složitější, protože k tomu je nutné použít větší množství dat, které obvykle se neposkytují dodavatelem.



Obrázek 2.1 Náhradní schéma trojvinut'ového AT, spojeného do tři paprskové hvězdy

Podle Maxwellových rovnic a Kirchoffových zákonů pro jednotlivá vinutí za předpokladu harmonických časových průběhů lze použít následující vztahy [5]:

Pro vyjádření napětí:

$$U_L = R_L \cdot I_L + \frac{d\Psi_L}{dt};$$

$$\Psi_L = N_L \cdot (\Phi_L + \Phi_M);$$

Pro magnetické toky vycházíme z první Maxwellové rovnice:

$$\Phi_L = K_L \cdot N_L \cdot I_L;$$

$$\Phi_L = K_M \cdot (N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 + N_3 \cdot I_3);$$

Kde K – magnetická vodivost příslušných cest.

Při zanedbaní transformačních napětí lze napsat:

$$U_L = R_L \cdot I_L + j \cdot \omega \cdot N_L \cdot [K_L \cdot N_L \cdot I_L + K_M \cdot (N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 + N_3 \cdot I_3)];$$

Z tohoto lze zavést příslušnou rozptylovou a magnetizační reaktance:

$$X_L = \omega \cdot N_{LN}^2 \cdot I_L;$$

$$X_M = \omega \cdot N_{LN}^2 \cdot K_M;$$

Taky určíme poměrný a absolutní převod AT:

$$t_L = N_1 / N_{NL};$$

$$P_{L1} = N_L / N_{N1};$$

Výhodou tohoto modelu je, že impedance jednotlivých vinutí jsou konstantní a platí pro nastavení jmenovitého počtu závitů. Je to případ ideálního AT, pro, než platí:

$$U_1 / U_2 = N_1 / N_2;$$

$$U_1 / U_2 = N_2 / N_1;$$

Výpočty parametrů náhradního schématu se provádí s využitím napětí a ztrát nakrátko. Celková impedance se spočítává dle následujících vztahů:

$$Z_1 = \frac{U_{N1}^2}{2} \cdot \left(\frac{u_{k12}}{S_{N2}} - \frac{u_{k13} - u_{k23}}{S_{N3}} \right);$$

$$Z_2 = \frac{U_{N2}^2}{2} \cdot \left(\frac{u_{k12}}{S_{N2}} - \frac{u_{k23} - u_{k13}}{S_{N3}} \right);$$

$$Z_3 = \frac{U_{N3}^2}{2} \cdot \left(\frac{u_{k13} + u_{k23}}{S_{N3}} - \frac{u_{k12}}{S_{N2}} \right);$$

kde u_{kij} – jsou poměrné napětí nakrátko.

Pro výpočty činného odporu se odvádějí analogické vztahy, ale místo poměrného napětí nakrátko se dosadí poměrné ztráty nakrátko.

$$R_1 = \frac{U_{N1}^2}{2} \cdot \left(\frac{p_{k12}}{S_{N2}} - \frac{p_{k13} - p_{k23}}{S_{N3}} \right);$$

$$R_2 = \frac{U_{N2}^2}{2} \cdot \left(\frac{p_{k12}}{S_{N2}} - \frac{p_{k23} - p_{k13}}{S_{N3}} \right);$$

$$R_3 = \frac{U_{N3}^2}{2} \cdot \left(\frac{p_{k13} + p_{k23}}{S_{N3}} - \frac{p_{k12}}{S_{N2}} \right);$$

kde p_{kij} – jsou poměrné ztráty nakrátko.

Rozptylové reaktance je možné se dopočítat pomocí Pifagorové věty:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2};$$

Magnetizační obvod se modelují paralelní spojenými činným odporem, který odpovídá ztrátám naprázdno a magnetizační reaktance. Tyto parametry lze vypočítat následovně[6]:

$$Z_M = U_{N1}^2 / S_{N1} / i_0;$$

$$R_0 = U_{N1}^2 / P_0;$$

$$X_M = \sqrt{\frac{1}{Z_M^2} - \frac{1}{R_0^2}};$$

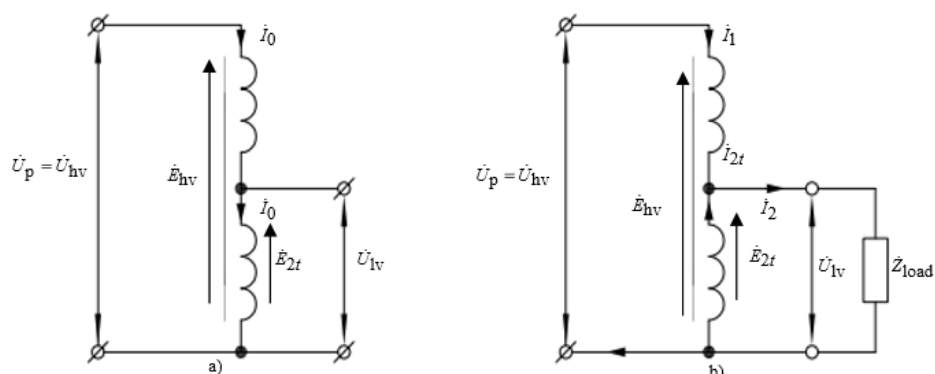
2.2 Sestavení vektorového diagramu AT

Vektorový diagram lze odvodit pro AT, zatížený jmenovitým výkonem a při stavu naprázdno. Ve stavu naprázdno, když je vysokonapěťové vinutí napájeno napájecím napětím, proud naprázdno se protéká přes vše vinutí a vytváří proměnný magnetický tok Φ . Podle zákona elektromagnetické indukce vytváří tento magnetický tok variabilní samoindukční elektromotorické napětí ve vysokonapěťových závitech vinutí, která je v antifrázi se síťovým napětím a je určena výrazem [5]:

$$e_{hv} = -\left(\frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{d\Psi_2}{dt}\right) = -(w_1 + w_2) \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

kde Ψ_1, Ψ_2 - je vazba toku sériového a paralelního vinutí AT,

$d\varphi / dt$ - rychlost změny magnetického toku



Obrázek 2.2 Model AT – a – stav naprázdno, b – režim zatížení [5]

Při rozdělení vysokonapěťového vinutí na sériové a paralelní elektromotorické samoindukční napětí vysokonapěťového vinutí lze představovat jako součet elektromotorických napětí samoindukce sériového a paralelního vinutí:

$$E_{hv} = E_1 + E_{2t}$$

Jejich efektivní hodnoty lze odvést pomocí výrazu:

$$E_{hv} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot (w_1 + w_2) \cdot \Phi_m$$

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot w_1 \cdot \Phi_m$$

$$E_{1v} = E_{2t} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot w_2 \cdot \Phi_m$$

Taky, kvůli úniku magnetickému toku existuje elektromotorické napětí netěsnosti:

$$E_{\sigma hv} = -j \cdot I_0 \cdot (x_1 + x_2)$$

kde x_1, x_2 – jsou úniková indukční reaktance sériového a paralelního vinutí. Pak podle druhého Kirchhoffova zákona pro uzavřenou smyčku má napěťová rovnice pro boční část vysokonapěťového vinutí ve stavu naprázdno následující tvar:

$$U_p = -E_{hv} + I_0 \cdot (r_1 + r_2 + j \cdot (x_1 + x_2)) = -E_{hv} + I_0 \cdot Z_{hv}$$

kde: Z_{hv} -impedance vinutí vysokého napětí.

$r_1 + jx_1$ - impedance sériového vinutí;

$r_2 + jx_2$ - impedance paralelního vinutí.

To znamená, že napájecí napětí je vyváženo samočinnou indukcí vysokonapěťového vinutí a poklesem napětí na impedance sériového a paralelního vinutí. Z tohoto můžeme určit transformační poměr AT:

$$k_{at} = \frac{E_{hv}}{E_{lv}} = \frac{w_1 + w_2}{w_2} = 1 + \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{hv-n}}{U_{20}}$$

kde U_{20} je napětí na svorkách nízkého napětí (LV) vinutí v režimu XX při jmenovitém napětí vinutí VN.

Magnetomotorické napětí je určené následujícím výrazem [5]:

$$F_0 = F_1 + F_2;$$

kde: F_0 - magnetomotorické napětí ve stavu naprázdno;

F_1 - magnetomotorické napětí sériového vinutí;

F_2 - magnetomotorické napětí paralelního vinutí.

Proud ve stavu naprázdno je dán [5]:

$$I_0 = I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{at}}\right) + I_{2t} \cdot \frac{1}{k_{at}}$$

S ohledem na to, že proud I_0 nepřekračuje 1 % od jmenovitého, jeho je možné zanedbat a výraz pro magnetomotorické napětí má tvar:

$$I_1 \cdot w_1 = -I_2 \cdot w_2$$

Z tohoto je možné říct, že proudy sériového a paralelního vinutí je a antifázích. V souladu z Kirchhoffovými zákony je:

$$I_2 = I_1 - I_{2t}$$

$$U_p = U_{hv} = -E_{hv} + I_1 \cdot (r_1 + j \cdot x_1) + (I_1 - I_2) \cdot (r_2 + j \cdot x_2)$$

Síťové napětí v zatíženém stavu, stejně jako ve stavu naprázdno, je vyváženo samoindukčním elektromotorickým napětím vysokonapěťového vinutí a poklesy napětí v sériovém a paralelním vinutí. Složka poklesu napětí paralelního vinutí však závisí na rozdílu mezi proudy sériového vinutí a zátěží. Napěťovou rovnici pro stranu TV lze odvodit jako [5]:

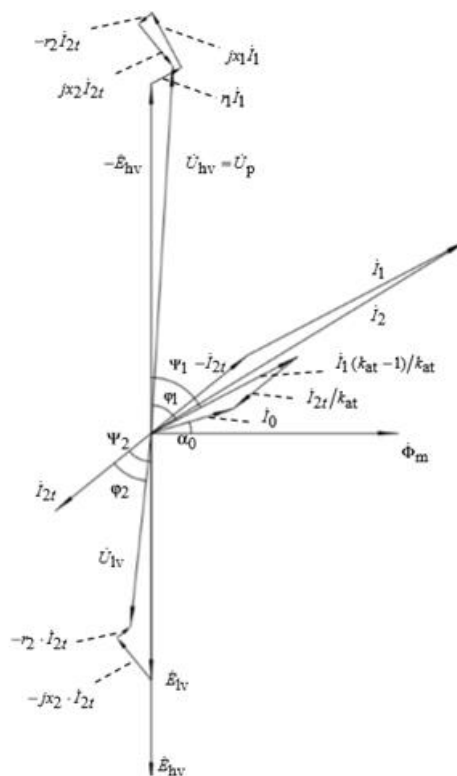
$$U_{1v} = E_{2w} - (I_1 - I_2) \cdot (r_2 + j \cdot x_2)$$

Tento výraz charakterizuje vinutí NN jako zdroj elektrické energie, což odpovídá skutečným fyzikálním procesům zatěžovaného spouštění AT.

Na základě výše uvedených rovnic můžeme odvézt soustavu rovnic, charakterizujících provoz AT ve stavu naprázdno a při zatížení [5]:

$$\begin{cases} U_p = U_{hv} = -E_{hv} + I_1 \cdot (r_1 + j \cdot x_1) + (I_1 - I_2) \cdot (r_2 + j \cdot x_2) \\ U_{1v} = E_{2w} - (I_1 - I_2) \cdot (r_2 + j \cdot x_2) \\ I_2 = I_1 - I_{2t} \\ I_0 = I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{at}}\right) + I_{2t} \cdot \frac{1}{k_{at}} \end{cases}$$

Na základě této soustavy je možné sestavit vektorový diagram AT ve zatíženém stavu, který je uveden na obr. 2.3. Dána soustava a odpovídající diagram odrážejí skutečné fyzikální procesy provozu autotransformátoru s postupným snižováním a jsou univerzální pro různé provozní režimy.



Obrázek 2.3 Vektorový diagram AT [5]

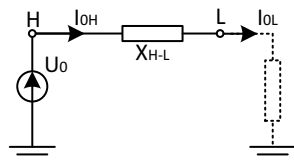
2.3 Model AT v netočivé soustavě

Vinutí autotransformátoru jsou vzájemně propojena nejen magneticky, ale také elektricky. Proto protékání proudů nulové složky v nich má svojí vlastností, které se zobrazují na náhradním schématu AT.

Impedance nulové složky autotransformátoru je určena jeho konstrukcí a schématem zapojení vinutí. Nejčastěji se vyskytují následující případy:

Autotransformátor se dvěma vinutí, který má cestu pro nulové proudy v sekundárním obvodu

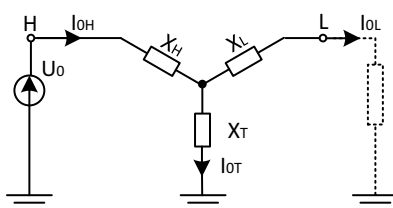
Jeho náhradní schéma je představená celkovou rozptylovou reaktancí, jak znázorněno na obr.2.4. Také, v tomto případě je možné zanedbat parametry magnetického obvodu a činné odpory vinutí. [13]



Obrázek 2.4 Náhradní schéma AT se dvěma vinutí. [13]

Autotransformátor s terciálním vinutím, zapojeným do trojúhelníka

Jsou jedním z nejčastěji používaných druhů AT v přenosové a distribuční soustavách. Jejich náhradní schéma je stejná s náhradním schématem trojvinutového transformátoru s podmínkou stejného spojení vinutí. [13]



Obrázek 2.5 Náhradní schéma AT se třemi vinutí. [13]

Autotransformátor s uzemněným přes reaktance nulovým vodičem

Při sestavení náhradního schématu nulové sekvenci je nutné uvést vliv reaktanci nulového vodiče na reaktanci spojených primárního a sekundárního vinutí. Pro případ AT se dvěma vinutí výsledná reaktance dle [13] se rovná:

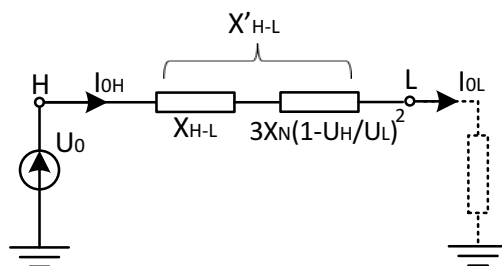
$$X'_{H-L} = X_{H-L} + 3 \cdot X_N \cdot \left(1 - \frac{U_H}{U_L}\right)^2;$$

Kde X_{H-L} – rozptylová reaktance AT, vztažená na primární napětí

U_H – primární napětí;

U_L – sekundární napětí;

X_N – náhradní reaktance nulového vodiče.



Obrázek 2.6 Náhradní schéma AT s dvěma vinutí a uzemněným přes reaktance nulovým vodičem [13]

V případě analogického AT, ale s třemi vinutí je nutné vyjádřit taky náhradní reaktanci pro spojení vinutí HV-TV a LV-TV. Pro spojení vinutí HV-TV dle [13] platí vztah [13]:

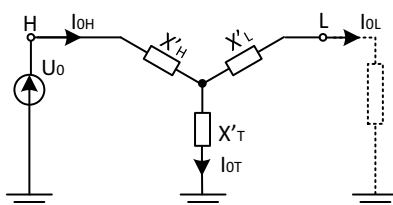
$$X'_{H-T} = X_{H-T} + 3 \cdot X_N;$$

kde X_{H-L} – náhradní reaktance spojení primárního a terciálního vinutí, vztažená na primární napětí;

Náhradní reaktance spojení LV-TV lze spočítat dle vztahu [13]:

$$X'_{L-T} = X_{L-T} + 3 \cdot X_N \cdot \left(\frac{U_H}{U_L}\right)^2;$$

kde X_{L-T} – náhradní reaktance spojení sekundárního a terciálního vinutí, vztažená na primární napětí.



Obrázek 2.7 Náhradní schéma AT s třemi vinutí a uzemněným přes reaktance nulovým vodičem [13]

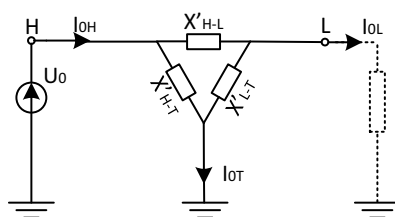
S použitím těchto vztahů je možné odvézt vztahy pro reaktanci jednotlivých vinutí. S ohledem na to, že jsou podobný vztahům pro transformátor se třemi vinutí lze napsat [13]:

$$\begin{cases} X'_H = X_H + 3 \cdot X_N \cdot \left(1 - \frac{U_H}{U_L}\right); \\ X'_L = X_L + 3 \cdot X_N \cdot \frac{U_H \cdot (U_H - U_L)}{U_L^2}; \\ X'_T = X_T + 3 \cdot X_N \cdot \frac{U_H}{U_L} \end{cases}$$

Kde X_i – jednotlivé reaktanci vinutí AT.

Taky je třeba říct, že neuzemněný nulový vodič dává takový vliv na AT se dvěma vinutí, že na schématu nulové sekvenci je ve stavu naprázdno. Jeho magnetický tok je zanedbatelně malý a lze položit, že reaktance magnetického obvodu se blíží nekonečnu.

Když AT má 3 vinutí, jak je zobrazené na obr. 2.8 je možná cirkulace nulových proudů v trojúhelníku, co má svůj vliv na náhradní impedance. Kvůli tomu, že proudy nulové složky v trojúhelníku kompenzují protékající proudy ve vinutích HV a LV. V tomto případě je nutné udělat transformaci náhradního schématu ze hvězdy do trojúhelníku.



Obrázek 2.8 Náhradní schéma AT s třemi vinutí a izolovaným nulovým vodičem při spojení do trojúhelníku [13]

Náhradní reaktancí v tomto případě jsou vztažené na sekundární napětí a jejich lze spočítat podle vztahů [13]:

$$\begin{cases} X'_{H-L} = (X_H \cdot \frac{U_H}{U_L} + X_L \cdot \frac{U_L}{U_H} + X_T \cdot \frac{(U_H - U_L)^2}{U_L \cdot U_H}) \cdot \frac{U_H^2}{U_L^2}; \\ X'_{H-T} = (X_H \cdot \frac{U_H}{U_H - U_L} + X_L \cdot \frac{U_L^2}{(U_H - U_L) \cdot U_H} + X_T \cdot \frac{U_H - U_L}{U_H}) \cdot \frac{U_H^2}{U_L^2}; \\ X'_{L-T} = X_H \cdot \frac{U_H^2}{(U_L - U_H) \cdot U_L} + X_L \cdot \frac{U_L}{U_L - U_H} + X_T \cdot \frac{U_L - U_H}{U_L} \cdot \frac{U_H^2}{U_L^2} \end{cases}$$

V tomto případě spojení vinutí do trojúhelníku je rezonanční, a proto:

$$X'_{H-L} + X'_{H-T} + X'_{L-T} = 0$$

Kde X'_{H-L} , X'_{H-T} , X'_{L-T} – náhradní reaktance trojúhelníku.

Napětí na nulovém vodiči lze spočítat dle [13].

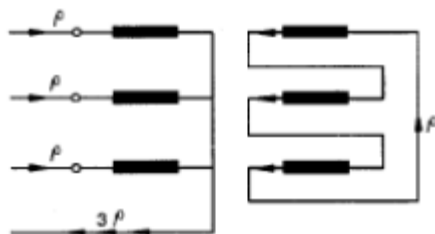
$$U_N = U_{0T} + I_{0L} \cdot jX_L - I_{0T} \cdot jX_T;$$

Kde I_{0L} , I_{0T} – sekundární a terciální proudy nulové sekvence

U_{0T} – napětí na vinuti trojúhelníku

Proud nulového vodiče, jak je na obr. 6 je dan trojnásobkem rozdílu primárního a sekundárního proudů.

$$I_N = 3 \cdot (I_{0H} - I_{0L});$$

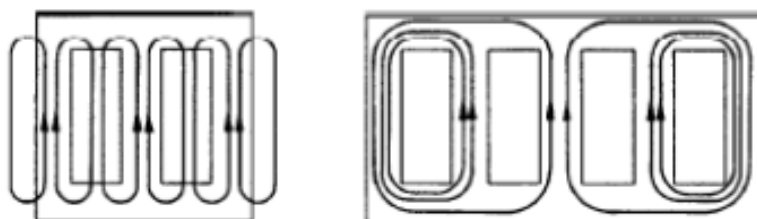


Obrázek 2.9 – Protěkání proudů nulovým vodičem [13]

Magnetizační impedance v netočivé soustavě

Je-li na trojfázové sloupky autotransformátoru přiložena soustava indukovaných napětí, která obsahuje nulovou složku, pak chování závisí na geometrii magnetického obvodu a spojení vinutí.

V AT se třemi sloupky se nestejně toky ze 3 sloupků ve spojce neruší. Zbytková nulová složka toku uzavírá svou cestu vně železného jádra. To znamená vysokou reluktanci a nízkou magnetizační impedanci pro nulovou složku napětí. Jev značného toku vycházejícího z magnetického obvodu a uzavírajícího se vně může také nastat podmínek spínacích přechodových jevů. [14]



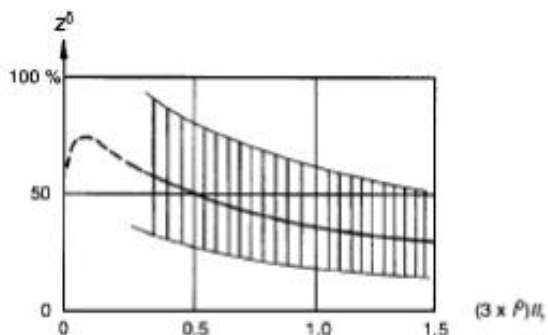
Obrázek 2.10 Nulová složka magnetizace jader se třemi a pěti sloupky [14]

V t AT s pěti sloupky představují vnější sloupky bez vinutí zpětnou cestu s malou reaktancí, kterou může procházet nulová složka toku. Odpovídající magnetizační impedance je vysoká jako pro normální souslednou složku toku. Totéž platí pro plášťové trojfázové autotransformátory a samozřejmě pro soustavu tří oddělených jednofázových jednotek. Avšak nulová složka přiloženého napětí a proudu je také ovlivněna trojfázovým spojením vinutí. [14]

Ekvivalentní diagram trojfázového AT pro nulovou složku se skládá ze sériové impedance a paralelní větve. Součet impedancí obou sériových prvků je roven normální impedanci nakrátko pro souslednou složku. Magnetizační impedance závisí na konstrukci magnetického obvodu. Jádro s 5

sloupky nebo plášťový magnetický obvod představují velmi vysokou magnetizační impedanci pro nulovou složku napětí. Jádru se třemi sloupky má naopak průměrnou magnetickou impedanci pro nulovou složku napětí.[14]

Rozptylový tok ve spojce indukují tok přídavných proudů kolem nádoby. Proto je rozdíl mezi transformátory se zmíněnou nádobou z tenkých ocelových desek a transformátory majícími nádoby z kotlových plátů. Obecná závislost impedance na proudu je uvedena na obrázku 9.

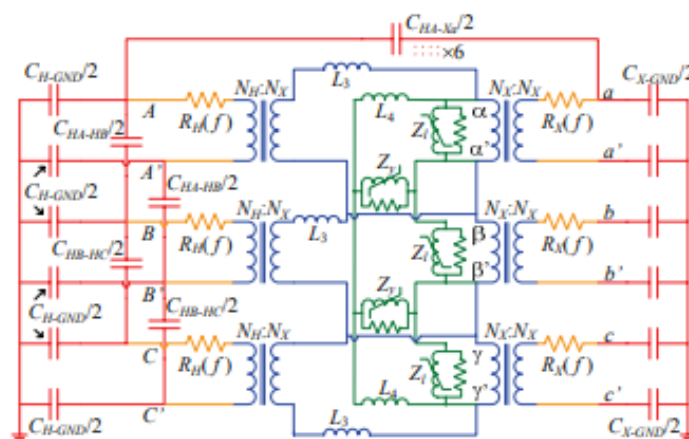


Obrázek 2.11 Závislost nulové složky magnetizační impedance transformátoru s třemi sloupky [14]

2.4 Modely AT ve vybraných softwarech

2.4.1 Zadaní autotransformátoru v programu EMTP-ATP

Model HYBRID je založen na magnetickém obvodu transformátoru. Únik a hlavní toky jsou poté rozděleny do základního modelu pro hlavní tok a matici inverzní indukčnosti pro svodový tok. Ztráty mědi a kapacity cívky se přidávají na svorkách transformátoru. Používají se pouze standardní prvky EMTP. [4]



Obrázek 2.12 Náhradní schéma modelu HYBRID v programu EMTP-ATP [4]

Úniková indukčnost

Indukčnost úniku je modelována s inverzní funkcí indukční matice (A-matice). Matice má rozměr $(n_w + 1) \cdot n_p$ kde n_w je počet fyzických vinutí, jádro je připojeno k vinutí $n_w + 1$ a n_p je číslo fází. Spojení fáze a posun se vyrábí přímo v A-matici. Všechny možné fázové posuny jsou podporovány. A-matice má následující strukturu [4]:

$$A = \begin{bmatrix} A_w & 0 & 0 \\ 0 & A_w & 0 \\ 0 & 0 & A_w \end{bmatrix}, \text{ kde } A_w = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

Předpokládá se, že A-matice nemá žádnou vzájemnou vazbu mezi fázemi. Celý efekt nulové sekvence je modelován v připojeném jádru.

Odpor vinutí

Odpor vinutí se přidává externě na svorce transformátoru (A-matice). Volitelně mohou být odpory závislé na frekvenci. Je vytvořena funkce, která trvá v parametru u [kV] a s [MVA] a vrátí hodnotu odpor v% [4]:

$$R_w = 0,7537 \cdot \left(\frac{u}{15} \right)^{0,0859} \cdot s^{-0,2759} [\%];$$

V případě autotransformátoru zkratové odpory se přepočítají podle výkonové rovnováhy.

Frekvenční závislost

Frekvenčně závislý odpor se počítá mezi 0,1 až 10 kHz. Typické hodnoty a odpory protokolu předpokládají se ze vztahu [4]:

$$R(\omega) = R_0 \cdot \sqrt{\omega / \omega_0};$$

kde R_0 je odpor při úhlové výkonové frekvenci ω_0 . Tento výraz vede k podstatně nižším hodnotám. Předpokládá se, že jsou přizpůsobeny funkce. [4]

$$R(\omega) = R_0 + \frac{R_1 \cdot \omega \cdot L_1^2}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} + \frac{R_2 \cdot \omega \cdot L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2};$$

s odpory R_1 a R_2 a indukčnostmi L_1 a L_2 jako neznámé.

Kapacita

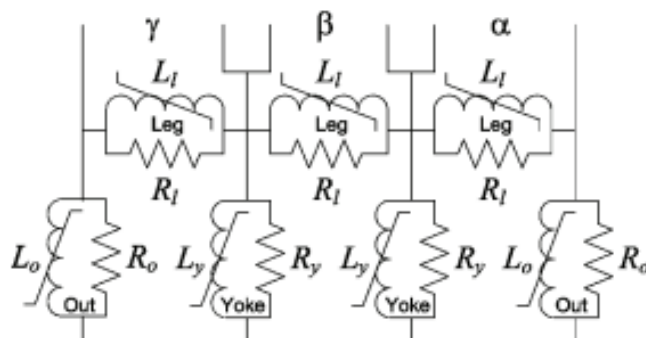
C-matice je rozdělena na dvě poloviny a ke každé je připojen konec fyzického vinutí. Kapacitní matice C je na základě následujících dvou matic [4]:

$$C_w = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad \text{a} \quad C_p = \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AC} \\ C_{BA} & C_{BB} & C_{BC} \\ C_{CA} & C_{CB} & C_{CC} \end{bmatrix}$$

Matice C_w obsahuje kapacity mezi vinutími ve všech fázích. Matice C_p obsahuje kapacity, které jsou specifické pro fázi A, B nebo C. To jsou obvykle připojeno k vnějšímu vinutí. Celková matice je pak postavená na těchto dvou symetrických maticích v závislosti na typu vinutí.

Jádro

Předpokládá se, že magnetický materiál je charakterizován čtyři parametry a, b, d, e. Seznam typických ocelových materiálů je vyvinut na základě přizpůsobení údajů výrobce ze stavu katalogů umění. Starší ocelové materiály budou mít jiné charakteristiky a ztráty jsou obvykle vyšší. Seznam materiálů se používá pouze pro návrhová data a typické hodnoty.



Obrázek 2.13 Model autotransfórmátoru s 5 sloupky v programu EMTP-ATP [4]

Předpokládá se, že vztah B / H následuje Frolichova rovnice:

$$B = \frac{H}{a + b \cdot |H|};$$

Předpokládá se, že ji bude následovat konkrétní ztráta [4]:

$$p[W / kg] = \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5} \cdot (d \cdot B^2 + e \cdot B^{10})$$

kde f je napájecí frekvence.

Zadaní parametrů autotransfórmátorů

Parametry autotransfórmátoru lze zadat pomocí okna nastavení parametrů.

	Prim.	Sec.	Tert.
L-L voltage [kV]	230	121	10.5
Power [MVA]	200	200	100
Connections	A	A	D
Phase shifts	0	0	30
Node names	X0016	X0015	X0009

Obrázek 2.14 Nastavení parametry modelu HYBRID TRANSFORMER

Jak je vidět z obr. 2.6 okno zadávání parametrů je možné rozdělit na 3 části:

Structure

Tady se zadávají frekvence autotransformátoru a počet fází a vinutí. Taky lze zadat jeden ze následujících magnetických odporů:

- TRIPLEX
- 3-leg staked
- 5-leg staked
- Shell-form A
- Shell-form B

Ratings and connections

V této části se zadává jmenovité napětí a jmenovitý výkon každého ze vinutí. Taky lze vybrat spojení primárního, sekundárního a terciálního vinutí – hvězda, autotransformátor anebo trojúhelník.

Data

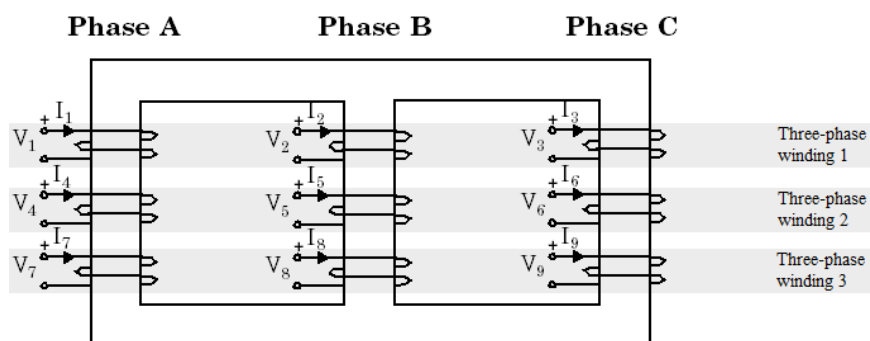
Tady se zadávají vstupní hodnoty pro výpočet impedance, například velikost zkratových napětí anebo ztráty nakrátko.

2.4.2 Model autotransformátoru v programu SIMULINK

V programu SIMULINK autotransformátor je možné zadat pomocí vložených bloků „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ a „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type“ (Two Windings)“. Podle zadaného autotransformátoru je nutné zvolit blok, určený pro trojvinutový autotransformátor.

Model „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ simuluje třífázový trojvinutový transformátor. Je postaven na základě třech jednofázových transformátorů. Model může brát v úvahu nelinearitu magnetizační charakteristiky materiálu jádra a zohledňuje vazby mezi vinutími různých fází. Geometrie jádra je taková, že fázové vinutí 1 je spojeno se všemi ostatními fázovými vinutími (2 až 9). [1]

Magnetizační obvod a vinutí jsou na obr.1



Obrázek 2.15 Náhradní model bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK [1]

Blok „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ implementuje následující vztah matice [1]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \dots & L_{19} \\ L_{21} & L_2 & \dots & L_{29} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{91} & L_{92} & \dots & L_9 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_9 \end{bmatrix}$$

R1 až R9 představují odpory vinutí. Vlastní indukční členy L_{ii} a vzájemně indukční členy L_{ij} se počítají z napěťových poměrů, indukční složky budících proudů bez zátěže a zkratových reakcí při jmenovité frekvenci.

Vlastní a vzájemné členy matice (9x9) L se získávají z budících proudů a zkratových reaktantů.

Za předpokladu následujících parametrů s pozitivní posloupností pro třífázová vinutí i a j (kde i = 1,2 nebo 3 a j = 1,2 nebo 3):

Q_{1i} - třífázový jalový výkon absorbovaný vinutím i bez zátěže, když je vinutí i buzené napětím kladné sekvence V_{nomi} s otevřeným vinutím j

Q_{1j} - třífázový jalový výkon absorbovaný vinutím j bez zátěže, když je vinutí j buzené napětím s kladnou sekvencí V_{nomj} s otevřeným vinutím

X_{1ij} - zkratová reaktance pozitivní sekvence při pohledu z vinutí i, když je vinutí j zkratováno

Pozitivní sekvence sebe a vzájemné reaktance jsou dány [5]:

$$X_1(i,i) = \frac{U_{nom_i}^2}{Q_{1i}}; \quad X_1(j,j) = \frac{U_{nom_j}^2}{Q_{1j}};$$

$$X_1(i, j) = X_1(j, i) = \sqrt{X_1(j, j) \cdot (X_1(i, i) - X_{1_{ij}})};$$

Vlastní reaktance s nulovou posloupností a vzájemná reaktance se také počítají pomocí podobných rovnic.

Rozšíření z následujících dvou (3x3) reaktančních matic v pozitivní posloupnosti [5]:

$$\begin{bmatrix} X_1(1,1) & X_1(1,1) & X_1(1,1) \\ X_1(2,1) & X_1(2,2) & X_1(2,3) \\ X_1(3,1) & X_1(3,2) & X_1(3,3) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_0(1,1) & X_0(1,1) & X_0(1,1) \\ X_0(2,1) & X_0(2,2) & X_0(2,3) \\ X_0(3,1) & X_0(3,2) & X_0(3,3) \end{bmatrix}$$

do matice (9x9), se provádí nahrazením každého z devíti párů [X1 X0] submaticí (3x3) ve tvaru [5]:

$$\begin{bmatrix} X_S & X_M & X_M \\ X_M & X_S & X_M \\ X_M & X_M & X_S \end{bmatrix}$$

kde vlastní a vzájemné podmínky jsou dány:

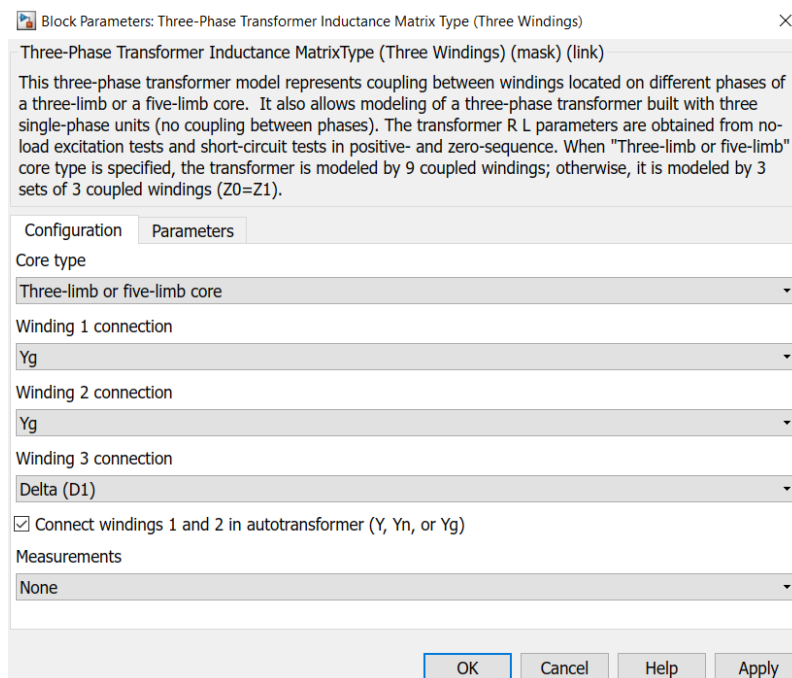
$$X_S = (X_0 + 2 \cdot X_1) / 3;$$

$$X_M = (X_0 - X_1) / 3$$

Aby bylo možné modelovat ztráty jádra, jsou na svorky jednoho z třífázových vinutí také připojeny další bočníkové odpory. Pokud je zvoleno vinutí i, odpory se počítají jako [5]:

$$R_1(i, i) = \frac{U_{nom_i}^2}{P_{1_i}}; \quad R_1(j, j) = \frac{U_{nom_j}^2}{P_{1_j}};$$

Parametry transformátoru lze nastavit pomocí 2 oken – první je nastavením konfigurace AT, druhé se uvádí fyzikální parametry.



Obrázek 2.16 Okno „Configuration“ bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK

Spojení vynutí lze vybrat ze seznamu:

Y-hvězda;

Yn – hvězda s neutrálem;

Yg – hvězda s uzemněným neutrálem;

Delta (D1) - trojúhelník první skupiny (posunutí napětí o 30° ve směru zpoždění, v porovnání s připojením ke hvězdě); [1]

Delta (D 11) - trojúhelník jedenácté skupiny (posunutí napětí o 30° na přední stranu, v porovnání s hvězdným spojením). [1]

Typ konstrukci magnetického obvodu:

Three single-phase cores – používá jenom parametry sousledné složky, netočivá složka se zanedbává. [1]

Three-limb or five-limb cores – bere v úvahu parametry sousledné, zpětné a netočivé složky. [1]

Měření:

Hodnoty měřicích parametrů se vybírají ze seznamu:

Winding voltages – napětí vinutí;

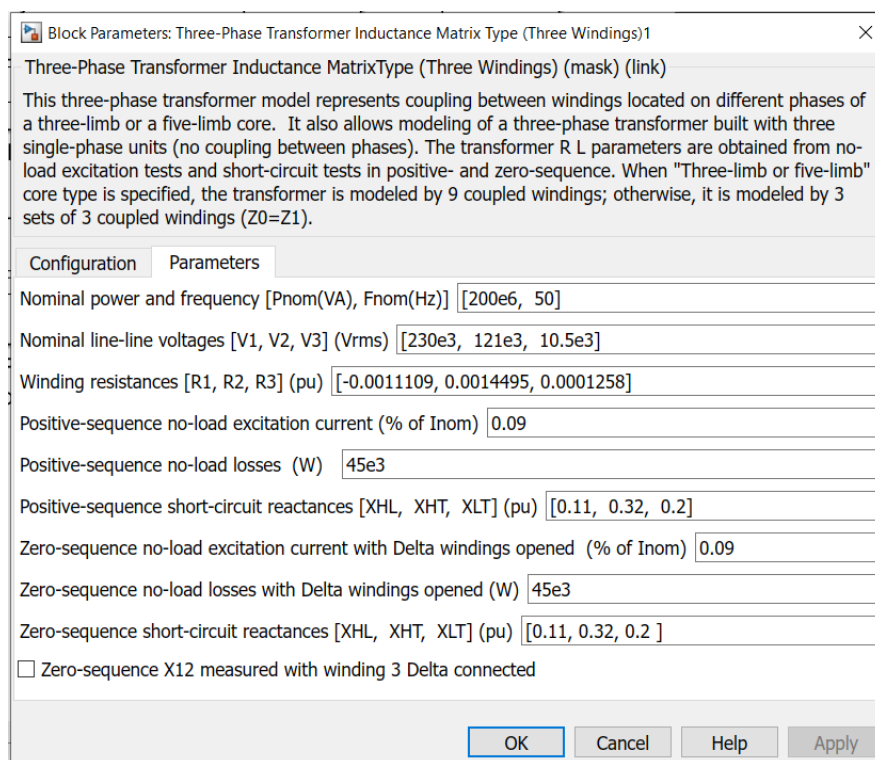
Winding currents – proudy tekoucí ve vinutí;

Flux and excitation current – tok a proud ve stavu naprázdno;

Flux and magnetization current – tok a magnetizační proud;

All measurements – všechna napětí, proudy a tok.

Parametry autotransformátoru lze zadat pomocí vloženého okna „parameters“.



Obrázek 2.17 Okno „parameters“ bloku „Three-phase Transformer Inductance Matrix Type (Three Windings)“ v programu SIMULINK

Parametry bloku se zadávají pomocí vektorů.

Nominal power and frequency – jmenovitý výkon a frekvence autotransformátoru:

Nominal line-line voltages – jmenovité lineární napětí vinutí se zadávají ve Voltech.

Winding resistances – hodnoty činných odporů vinutí lze zadat pouze v poměrných hodnotách.

Positive-sequence no-load excitation current – uvádí velikost proudu sousledné složky ve stavu naprázdno v procentech od jmenovitého proudu.

Positive-sequence no-load losses – ztráty sousledné složky ve stavu naprázdno.

Positive-sequence short-circuit reactance's – zkratová reaktance sousledné složky.

Zero-sequence no-load excitation current with Delta windings opened – velikost proudu netočivé složky ve stavu naprázdno při rozpojení terciálních vinutí

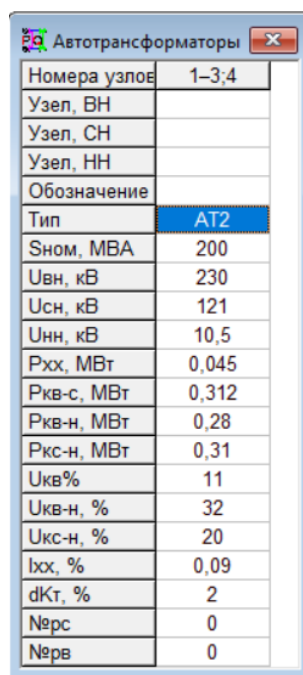
Zero-sequence no-load losses with Delta windings opened – velikost strat naprázdno netočivé složky ve stavu naprázdno při rozpojení terciálních vinutí

Zero-sequence short-circuit reactance's – zkratová reaktance nulové složky.

2.4.3 Model autotransformátoru v programu ENERGY

Model autotransformátoru v softwaru ENERGY je identický s modelem transformátoru se třemi vinutími. V konstrukčním schématu je reprezentován třemi větvemi ve spojení „hvězda“. Vinutí vysokého napětí je modelováno větví s podélným odporem a příčnou vodivostí, odrážející ztráty naprázdno. Vinutí středního a nízkého napětí jsou modelována větvemi se transformačními poměry a podélnými impedancemi.

Vypočtené parametry větví se určují na základě štítkových údajů tří vinutí transformátoru, které se zadávají a editují v uvedené dolů tabulce. [2]



Номера узлов	1-3;4
Узел, ВН	
Узел, СН	
Узел, НН	
Обозначение	
Тип	AT2
Сном, МВА	200
Uвн, кВ	230
Uсн, кВ	121
Uнн, кВ	10,5
Рхх, МВт	0,045
Ркв-с, МВт	0,312
Ркв-н, МВт	0,28
Ркс-н, МВт	0,31
Uкв%	11
Uкв-н, %	32
Uкс-н, %	20
Iхх, %	0,09
dKт, %	2
Нерс	0
Нерв	0

Obrázek 2.18 Tabulka zadávání parametrů AT v programu ENERGY CS

Pole v těchto tabulkách obsahují následující informace:

Номера узлов – čísla uzlů konstrukčního schématu, ke kterému jsou připojené tři vinutí transformátoru.

Узел ВН – název uzlu, ke kterému je připojeno vinutí vysokého napětí.

Узел СН – název uzlu připojení vinutí středního napětí.

Узел НН – název uzlu připojení vinutí nízkého napětí.

Tito pole umožňují zadat do schématu návrhu autotransformátory se třemi vinutími v tabulkové formě bez použití grafického editoru, přičemž do modelu musí být již zadány potřebné uzly. [2]

Když se přidá nový transformátor nebo se změní jeho místo připojení, automaticky se vytvoří nebo změní větve náhradního schématu a uzel odpovídající středu hvězdy ekvivalentního obvodu transformátoru se třemi vinutími.

Обозначение – symbolické označení transformátoru se třemi vinutími

Тип – typ transformátoru odpovídající jeho pasovým údajům. Lze vybrat z vyhledávací tabulky autotransformátorů, která se zobrazí, když je vybráno toto pole. Současně s tímto polem se určují další parametry objektu v souladu s údaji o pasu uvedenými v referenční tabulce.

Сном – jmenovitý výkon transformátoru.

U_{ВН} – jmenovité napětí vyššího vinutí.

U_{СН} – jmenovité napětí středního vinutí.

U_{НН} – jmenovité napětí nejnižšího vinutí

P_{xx} – ztráty činného výkonu chodu naprázdno transformátoru při jmenovitém napětí vyššího vinutí.

P_{кв-с} – ztráty nakrátko mezi vinutím vysokého a středního napětí, vztažené na výkon menšího vinutí.

P_{кв-н} – ztráty nakrátko mezi vinutím vyššího a nižšího napětí, vztažené na výkon menšího vinutí.

P_{кс-н} – ztráty nakrátko mezi vinutím středního a nízkého napětí, vztažené na výkon menšího vinutí.

U_{KB-C} – napětí nakrátko mezi vinutími vyššího a středního napětí související se jmenovitým výkonem transformátoru.

U_{KB-H} – napětí nakrátko mezi vinutími vyššího a nízkého napětí související se jmenovitým výkonem transformátoru

U_{KC-H} – napětí nakrátko mezi vinutími středního a nízkého napětí související se jmenovitým výkonem transformátoru.

dK_{TB} – změna transformačního poměru pro jeden regulační stupeň ve vinutí vysokého napětí nebo neutrálu. Toto pole nelze upravovat, ale je určeno údaji o pasu vybraného transformátoru.

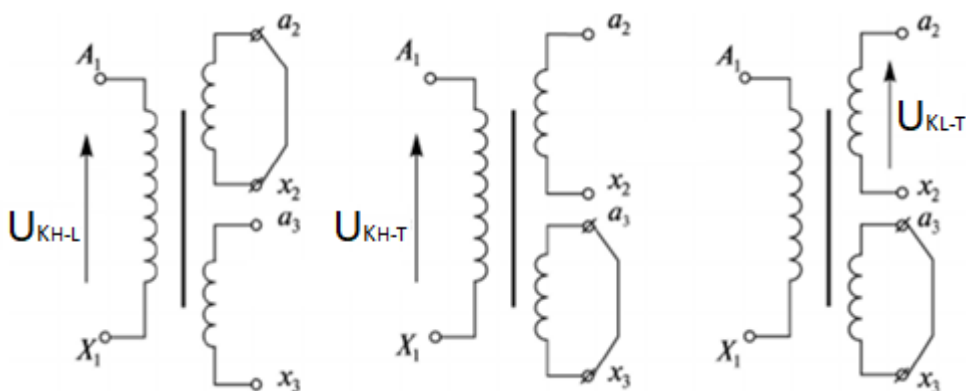
N_{epB} – zvolený počet stupňů regulace transformačního poměru transformátoru ve vinutí nebo neutrálu vysokého napětí. Číslo kroku „0“ odpovídá nominálnímu transformačnímu poměru.

dK_{Tc} – změna transformačního poměru pro jeden stupeň regulace ve vinutí vysokého napětí. Toto pole nelze upravovat, ale je určeno údaji o pasu vybraného transformátoru.

N_{epc} – zvolený počet stupňů regulace transformačního poměru transformátoru ve vinutí vysokého napětí. Číslo kroku „0“ odpovídá nominálnímu transformačnímu poměru.

2.5 Měření nakrátko

Režim nakrátko je takový, když jsou svorky sekundárního vinutí uzavřeny proudovým vodičem s nulovým odporem. Zkrat autotransformátoru během provozu vytváří nouzový režim, protože sekundární proud, a tedy primární, se zvyšuje několik desetkrát ve srovnání s nominálním.



Obrázek 2.19 Schéma zapojení AT pro měření nakrátko [9]

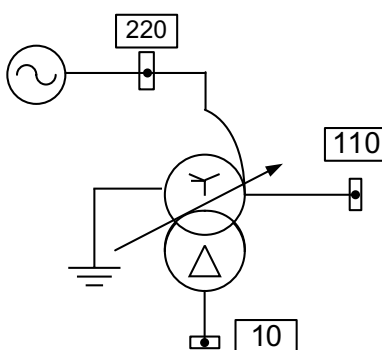
Toto měření se provádí za účelem stanovení parametrů transformátoru. Je sestaven obvod, ve kterém je sekundární vinutí zkratováno kovovou propojkou nebo vodičem s odporem blízkým nule. Na primární vinutí se aplikuje napětí U_k , při kterém se proud v něm rovná jmenovité hodnotě.

V režimu zkratu je napětí velmi malé, proto jsou ztráty naprázdno mnohokrát menší než při jmenovitém napětí. Můžeme předpokládat, že ztráty naprázdno nejsou ($P_0 = 0$) a výkon měřený wattmetrem je dan ztrátou výkonu P_k v důsledku aktivního odporu vinutí transformátoru.

Při jmenovitém proudu I_1 se získají jmenovité ztráty výkonu pro ohřev vinutí P_k , které se nazývají elektrické ztráty nebo zkratové ztráty. [9]

2.5.1 Výběr schéma pro výzkum stavů nakrátko.

Během měření stavů nakrátko autotransformátor se napájí regulovaným zdrojem napětí 220 kV. Schéma je na obrazovce 3.



Obrázek 2.20 Zvolená schéma pro měření nakrátko

Parametry autotransformátoru je uvedený v tabulce 2.1

Tabulka 2.1 Parametry autotransformátorů, zvoleného pro měření nakrátko

$U_{rTA}, \text{ kV}$	$U_{rTB}, \text{ kV}$	$U_{rTC}, \text{ kV}$	$S_{rTAB}, \text{ MVA}$	$S_{rTBC}, \text{ MVA}$	$S_{rTAC}, \text{ MVA}$	$U_{RrAB}, \%$	$U_{RrAC}, \%$	$U_{RrBC}, \%$
230	121	10,5	200	100	100	0,156	0,28	0,31
$u_{krAB}, \%$	$u_{krAC}, \%$	$u_{krBC}, \%$	$P_{krTAB}, \text{ kW}$	$P_{krTAC}, \text{ kW}$	$P_{krTBC}, \text{ kW}$	Spojeni	$I_0, \%$	$P_0, \text{ kW}$
11	32	20	312	280	310	Y0Y0D	0,09	45

$$U_{kAB} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot U_J = \frac{11}{100} \cdot 230 = 25,3 \text{ (kV)}$$

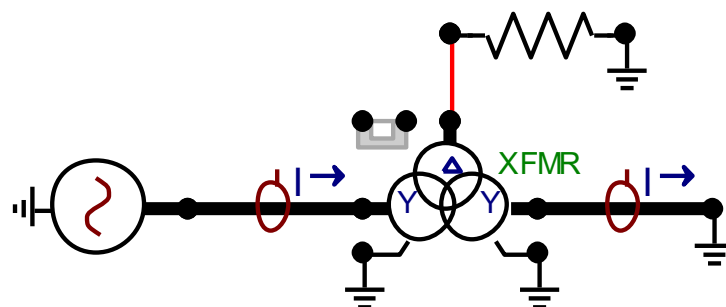
$$U_{kBC} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot U_J = \frac{10}{100} \cdot 121 = 12,1 \text{ (kV)}$$

$$U_{kAC} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot U_J = \frac{16}{100} \cdot 230 = 36,8 \text{ (kV)}$$

2.5.2 Měření nakrátko v programu EMTP-ATP

Program elektromagnetických přechodů neboli EMTP, je primárně simulačním programem elektroenergetiky. Může předvídat proměnné zájmu v rámci elektrických energetických sítí jako funkce času, obvykle po určitém rušení jako je zapnutí jističe nebo porucha. Používají ji také ti, kteří se specializují na moc elektronika. [4]

Výpočet provedeme pomocí programu EMTP-ATP. Zkoušku nakrátko provedeme mezi vinutí H-L. Hodnoty napájecího zdroje určíme 25,3 kV, AT určen pomocí modelu HYBRID.



Obrázek 2.21 Zapojení nakrátko vinutí HV a LV v programu EMTP-ATP

Zadávací okno s hodnotami je na obrázku 2.22

Hybrid transformer :

Structure

Number of phases: 3

Number of windings: 3

Type of core: 3-leg stacked

Test frequency [Hz]: 50

Data based on: Ind. Res. Cap. Core

Design param. ☐ Test report ☒ Typical values ☐

Ratings & connections

	Prim.	Sec.	Tert.
L-L voltage [kV]	230	121	10.5
Power [MVA]	200	200	100
Connections	A	A	D
Phase shifts	0	0	30
Node names	X0003	X0017	X0004

Winding sequence: core-inner-outer ☒ P ☒ S ☒ T

☐ Ext. neutral connections

☐ Hide core nodes

Data

Inductance Resistance Capacitance Core

Data equal to Resistance's Test report ☒ Zero sequence data available

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
P-S	11	200	312
P-T	32	100	280
S-T	20	100	310

zero sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
P-S	11	200	312
P-T	32	100	280
S-T	20	100	310

Order: 0 Label: Comment: ☐ Hide

OK Cancel Import Export Edit defin. Help

Obrázek 2.22 Zadání parametrů AT v programu EMTP-ATP

Stav nakrátko pro HV-LV, LV zkratováno, terciář naprázdno, na HV připojeno napětí nakrátko. Zjistíme proudy, tekoucí primárním a sekundárním obvody.

Z LIS souboru maximální hodnota bude 503 A na straně 220 kV a 955 kA na straně 110 kV.

Změnou konfigurace schématu dle obr. 2.19 dostaneme z LIS souborů hodnoty zkratových proudů pro případy LV-TV a HV-TV. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 2.2

Tabulka 2.2 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu EMTP-ATP

Zkrat	HV	LV	TV
HV-LV	503	955	-
LV-TV	-	481	$5,50 \cdot 10^3$
HV-TV	255	-	$5,51 \cdot 10^3$

2.5.3 Měření nakrátko v programu SIMULINK

Výpočty stavů nakrátko a naprázdno je možné provést v programovém komplexu MATLAB s použitím bloku pro výpočty elektrických sítí SIMULINK.

SIMULINK je dynamické interdisciplinární modelovací prostředí pro složité technické systémy. Jeho hlavním rozhraním je grafický nástroj pro mapování a přizpůsobitelná sada knihoven bloků. Nabízí těsnou integraci se zbytkem prostředí MATLAB a může buď používat MATLAB, nebo z něj vytvářet skripty. Simulink je široce používán v automatickém řízení a digitálním zpracování signálu pro simulaci více domén a design založený na modelů. [1]

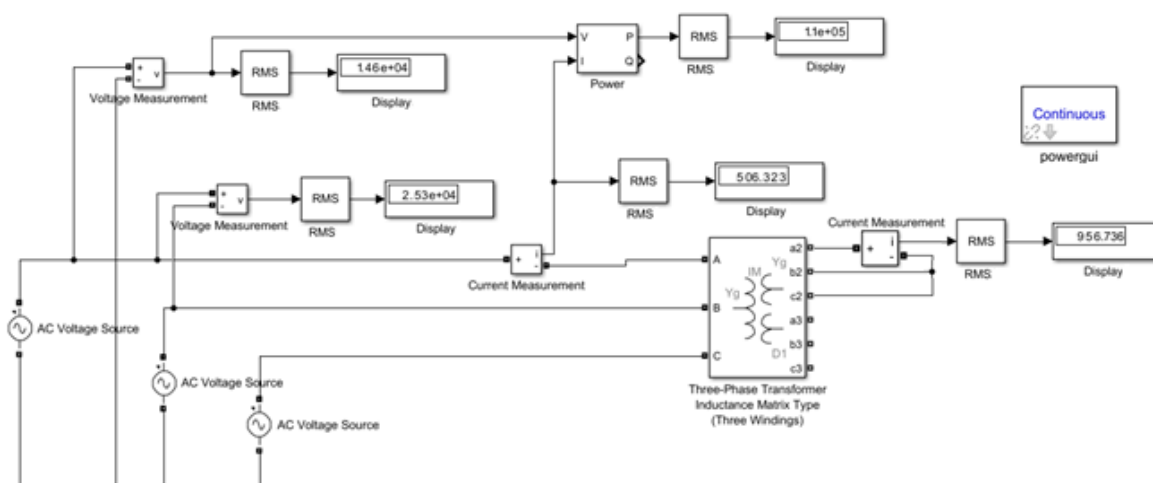
Autotransfórátor je možné zadat pomocí vnitřního bloku „Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type“. Je vytvářen pro možnost sestavení jak dvojvinut’ového, tak i trojvinut’ového transformátoru. Tento blok slouží k modelování trojvinut’ového třífázového transformátoru. Parametry objektu lze nastavit v následujících oknech:

Jak je vidět z obrázků 2.15 a 2.16, autotransfórátor má spojení „uzemněná hvězda“ na stranách VN a SN a trojúhelník na straně NN.

Měření se dá provést pomocí bloků „Three-Phase Measurement VI“, kteří se spojí s blokem pro grafické znázornění výsledků: „Scope“. [1]

Výpočty lze provést pomocí bloku „powergui“, kterým zadáváme druh výpočtu. Při výpočtu ustálených stavů je nutné zadat uvnitř bloku režim „Steady State“, který vypočítá ustálený stav při $t=0$ s. V tomto režim uvnitř bloku „powergui“ se vypočítají hodnoty proměnných parametru v zadaných uzlech. Výsledky mohou být představeny jak v obyčejných, tak i v amplitudových hodnotách.

Pro výpočet stavu nakratko HV-LV zapojíme podle obrázku 2.19.



Obrázek 2.23 Zapojení nakrátko vinuti HV a LV v programu SIMULINK

Stav nakrátko pro HV-LV, LV zkratováno, sekundár naprázdno, na HV připojeno napětí nakrátko. Z obrázku vyplývá, že na straně 220 kV teče proud 506 A, na straně 110 kV – 957 A.

Změnou konfigurace schématu dle obr. 2.19 dostaneme hodnoty zkratových proudů pro případy LV-TV a HV-TV. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 2.3

Tabulka 2.3 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu SIMULINK

Zkrat	HV	LV	TV
HV-LV	506	957	-
LV-TV	-	479	$5,50 \cdot 10^3$
HV-TV	252	-	$5,50 \cdot 10^3$

2.5.4 Měření nakrátko v programu ENERGY

Program ENERGY UR byl vytvořen na fakultě elektroenergetiky Ivanovské Statní Energetické Univerzity. Ten program slouží pouze k výpočtům ustálených stavů, také existují doplňující jeho programy ENERGY KZ a ENERGY POT, pomocí kterých je možné vypočítat zkraty v sítí anebo ztráty v různých elementech schéma.

Softwarový balíček Energy implementuje opakovaně testovanou a osvědčenou Newtonovu metodu řešení systému nelineárních rovňan výkonových rovnic v kombinaci s Gaussovou metodou řešení linearizovaných systémů rovnic při každé iteraci Newtonovy metody. Pro otevřené úseky sítě jsou implementovány speciální topologické výpočtové metody, které mohou významně zlepšit konvergenci Newtonovy metody v důsledku výrazného zmenšení dimenze systému řešených nelineárních rovnic. Použití topologických metod umožňuje vyřešit řadu konkrétních problémů použitelných pro otevřené obvody (jako je výpočet zátěží pro dodávku energie nebo energie v hlavní části), vypočítat otevřený obvod s přihlédnutím ke koeficientům nesouběžnost atd. [2]

Při výpočtu různých režimů elektrických systémů je velmi důležité pohodlí přípravy a opravy počátečních dat, jakož i jasnost získaných výsledků. Softwarový balíček Energy proto využívá modelování objektů elektrické sítě s automatickým generováním návrhového diagramu (modelu) a jeho grafického znázornění, které je blízké schematickému diagramu.

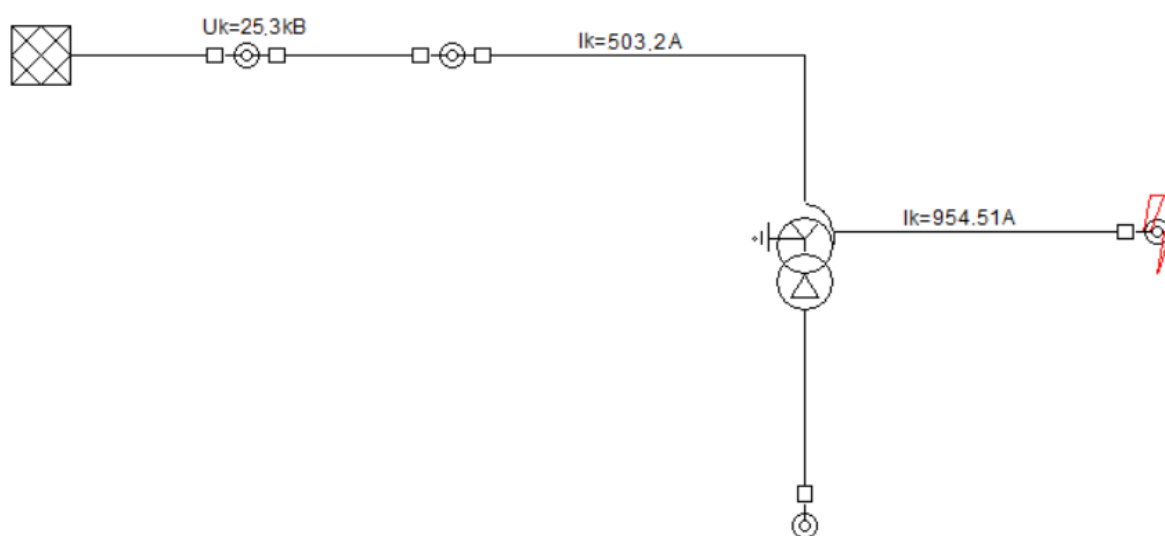
Proudy, tekoucí při stavu nakrátko, jak i proudy dvojfázového zkratu i zemním spojení, lze vypočítat pomocí bloku TKZ, který je jedním ze souboru program ENERGY. Pro možnost výpočtu

zkratů v uzlu 220 kV z důvodu technických omezení programu ENERGY bilanční uzel je oddělen od autotransformátoru impedancí $Z=j0,3 \text{ Ohm}$.

Sestavení modelu je určeno pomocí modelu trojfázového AT ze souboru „СПРАВОЧНИК.SPR“. Vstupní hodnoty jsou na obr. 2.24

Автотрансформаторы																	
№	Тип трансформатора	Сном кВА	Uв кВ	Uс кВ	Un кВ	Pх кВт	PкВС кВт	PкВН кВт	PкСН кВт	UкВС %	UкВН %	UкСН %	Iх %	dK %	Np	Снн %	Код изделия
1	AT2	200000	230	121	10,5	45	312	280	310	11	32	20	0,09	2	6	52,6	908787712

Obrázek 2.24 Zadání parametrů AT v programu ENERGY CS



Obrázek. 2.25 Zapojení nakrátko vinutí HV a LV v programu ENERGY CS

Tabulka 2.4 Výsledky měření stavů nakrátko zvoleného AT v programu ENERGY CS

Zkrat	HV	LV	TV
HV-LV	503	955	-
LV-TV	-	479	$5,51 \cdot 10^3$
HV-TV	249	-	$5,51 \cdot 10^3$

Porovnáme výsledky výpočtu v programů MATLAB, ENERGY a EMTP-ATP.

Tabulka 2.5 Porovnání výsledků měření ve vybraných programech

Zkrat	Proud	MATLAB	EMTP-ATP	ENERGY
HV-LV	I_{HV}	506	503	503
	I_{LV}	957	955	955
	I_{TV}	-	-	-
LV-TV	I_{HV}	-	-	-
	I_{LV}	477	481	479
	I_{TV}	$5,50 \cdot 10^3$	$5,50 \cdot 10^3$	$5,51 \cdot 10^3$
HV-TV	I_{HV}	252	255	249
	I_{LV}	-	-	-
	I_{TV}	$5,51 \cdot 10^3$	$5,51 \cdot 10^3$	$5,51 \cdot 10^3$

2.6 Měření nulové impedance autotransformátorů

Při zemních poruchách cirkulace proudů nulové posloupnosti je určena hlavně schématem spojení vinutí transformátorů a uzemnění jejich neutrále. Ve třífázových autotransformátorů se třemi vinutí jsou magnetické toky s nulovou sekvencí uzavřeny izolačním médiem a pláštěm, které se vyznačují vysokou magnetickou impedancí. Proto reaktance nulové složky je menší než reaktance sousledné a zpětné složek.

V praktických výpočtech, při absenci skutečných údajů o odporu nulové sekvence transformátoru Z_{0T} , je lze vypočítat následujícím výrazem [10]:

$$Z_{(0)} = (0,8 \div 1) \cdot Z_{(1)}$$

Velikost součinitele se volí v závislosti na jmenném napětí a konstrukce AT. Tak, v elektrizačních soustavách 220 kV je možné použít s malou chybou následující vztah [10]:

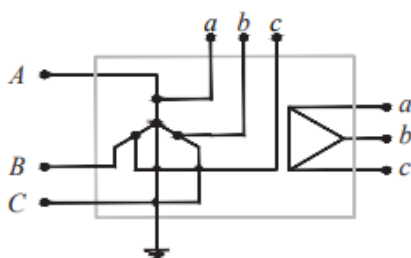
$$Z_{(0)} = Z_{(1)}$$

kde $Z_{(0)}$ je odpor nulové sekvence transformátoru, Ohm.

Pro tok proudů nulové posloupností ve vinutí transformátoru, když se na jeho svorkách objeví napětí netočivé složky, je nutné, aby toto vinutí mělo uzemněnou neutrál. Při vypracování ekvivalentního schématu sítí v nulové složce transformátory bez uzemněné neutrále se neberou v úvahu.

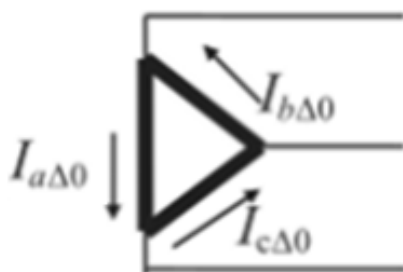
Schéma zapojení vinutí autotransformátoru

Hlavním rozdílem mezi autotransformátory a transformátorem je elektrické spojení mezi primárním a sekundárním vinutí. Autotransformátory jsou k dispozici se třemi vinutími, neutrála primárního a sekundárního vinutí je pevně uzemněná, a terciální vinutí je zapojeno do trojúhelníku. Na obr.2.26 je zobrazen ekvivalentní obvod nulové sekvence autotransformátoru.



Obrázek. 2.26 Obvod ekvivalentní nulové sekvence autotransformátoru [10]

Na obrázku 2.26 má autotransformátor uzemněné primární a sekundární vinutí a terciář je spojen do trojúhelníku. Proudů netočivé sekvence dosahují autotransformátoru ze stran vyššího a středního napětí a proudí na zem přes jeho neutrála, ale nešíří dále do terciářů, protože terciální vinutí je filtrem netočivých proudů. Proudů netočivé soustavy schopni se do něj transformovat, ale protékající fázovými vinutími se navzájem uzavírají. [10]



Obrázek 2.27 Průběh proudů netočivé soustavy v trojúhelníku [10]

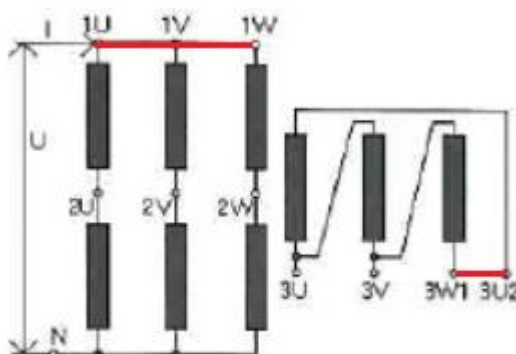
Impedance netočivé soustavy tedy se skládá z impedanci všech 3 vinutí. Výsledkem je, že autotransformátor v obvodu je zobrazen jako třípaprsková hvězda. Ale je nutně říct, že při sestavení náhradního schémata netočivé složkové soustavy pro případ zkratů na strany HV nebo LV všichni elementy, kteří se nacházejí na straně 10 kV za trojúhelníkem se zanedbávají.

Měření impedance nulové složky:

Při měření odporu s nulovou sekvencí se nastavuje schéma připojení vinutí autotransformátoru: lineární svorky tří fází jsou spojeny dohromady a měří se odpor mezi nimi a

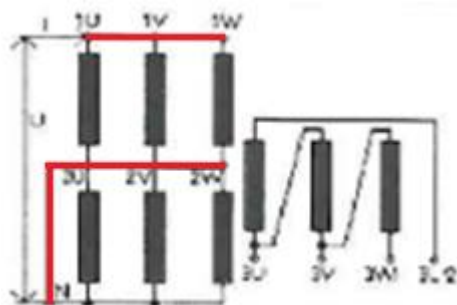
nulovou svorkou; taky musí být provedeno spojení vinutí do trojúhelníka. Nezbytné jsou provést 3 měření:

V prvním měření je nutné přiložit napětí mezi svorkami primárního vinutí a nulovým vodičem. Zkratuje se primární (1U-1 V-1 W) a terciální (3W1-3U2) vinutí.



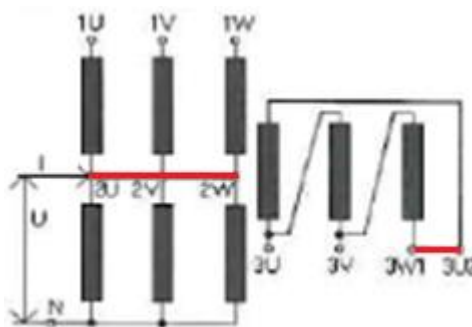
Obrázek 2.28 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí HV a TV [13]

V druhém měření napětí se přikládá mezi svorkami primárního vinutí a nulovým vodičem. Zkratuje se primární (1U-1 V-1 W) a sekundární (2U-2 V-2 W) vinutí.



Obrázek 2.29 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí HV a LV [13]

V posledním měření napětí se přikládá mezi svorkami sekundárního vinutí a nulovým vodičem. Zkratuje se sekundární (2U-2V-2W) a terciální (3W1-3U2) vinutí.



Obrázek 2.30 Měření impedanci netočivé složky pro zapojení nakrátko vinutí LV a TV [13]

Během zkoušek specifikujeme hodnoty proudu a napětí, při kterých se provádí měření.

Impedance, vyjádřenou v ohmech a redukovanou na jednu fázi, lze se vypočítat podle vzorce [10]:

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I}$$

kde U – napětí dodávané v experimentu, V;

I – celkový proud třífázových vinutí, A.

Podmínky a omezení pro provedení měření. [10]

Proud nesmí překročit jmenovitý proud neutrální svorky; proud ve vinutí zapojeném do trojúhelníku by neměl s ohledem na dobu trvání překročit hodnoty přípustné za podmínek ohřevu. [10]

Měření se provádí na třífázových autotransfornátorech s hvězdicovým vinutím s uzemněním. [10]

Měření se provádí při jmenovité frekvenci (tolerance $\pm 1\%$). [10]

Mezi připojené svorky vedení a neutrále je přivedeno napětí o jmenovité frekvenci. V tomto případě musí být schéma zapojení sestaveno na vinutí připojeném v trojúhelníku. [10]

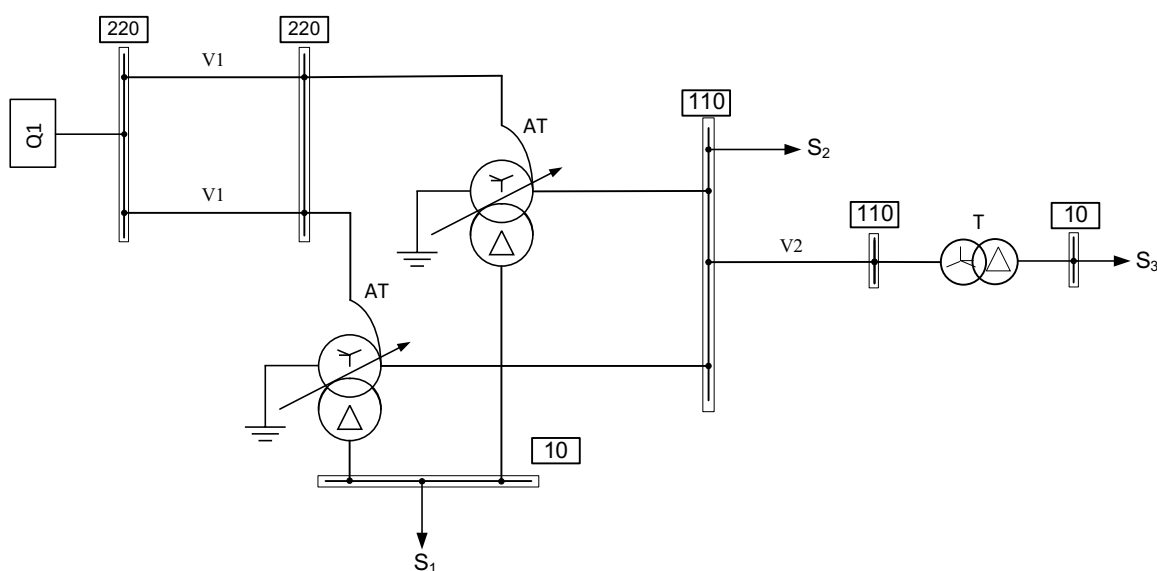
Hodnoty aplikovaného napětí U a proudu I během experimentu by neměly překračovat limity přípustné pro vinutí a svorky transformátoru a během experimentu by měly způsobovat znatelné zahřívání. [10]

Ve vinutí s regulací napětí se měří při nastavení na hlavní odbočku ($K=0$). [10]

3 SESTAVENÍ ZJEDNODUŠENÉHO MODELU SÍTĚ S AUTOTRANSFORMÁTORY

3.1 Popis schéma

Schéma pro výzkum autotransformátorů je zobrazeno na obr. 3.1. Obsahuje 3 odběrová místa, které jsou napájeny ze sítě 220 kV. Spojení se soustavou je provedeno pomocí dvou vedení 220 kV a autotransformátorů. Vzhledem k tomu, že odběry 1 a 2 obsahují spotřebiče všech spolehlivostních skupin, jejich napájení musí být zálohováno, což zajišťujeme pomocí dvojitých vedení a autotransformátorů. Odběrové místo 3 zahrnuje jen spotřebiče 3 spolehlivostní skupiny a můžeme je napájet bez zálohování.



Obrázek 3.1 Schéma navržené sítě pro výpočty ustáleného stavu a zkratových proudů

Navržená síť je spojena s energetickou soustavou přes napáječ Q1, zaustený do přípojnice 220 kV. Parametry napáječe jsou v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 – parametry napáječe

Síťový napáječ	U_n , kV	C_{max}	$I''_k(3f)$, kA	$I''_k(1f)$, kA	R_1/X_1	R_0/X_0
Q1	220	1,1	20	10	0,1	0,1

3.1.1 Určení velikostí odběrů.

Navržená síť obsahuje 3 odběrová místa na různých hladinách napětí od 10 až 110 kV. Ve schématu jsou zapojeny spotřebiče všech 3 skupin spolehlivosti vzhledem k tomu, že musíme zajistit zálohování, aby nedošlo k přerušení dodávky elektřiny. Tuto zálohu zabezpečíme instalací 2 autotransfómátóřů do napájecí trafostanice 220/110 kV. Parametry odběřů jsou v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Parametry spotřeby

Odběr	P, MWt	Q, Mvar	U, kV	Spolehlivostní skupina
1	10	3,3	10	I, III
2	84	27,6	110	I, II, III
3	25	8,26	10	III

Jalový výkon Q je určen tak, aby $\cos\phi$ byl nejméně 0,95.

3.1.2 Transformátory v elektrizační soustavě

Autotransfómátory ve schématu slouží ke spojení přenosové a distribuční sítě. Z hlediska bezpečností, je na každém z autotransfómátóřů uzemněn uzel vinutí vyššího napětí. Z konstrukčního hlediska, není možná regulace napětí na straně nižšího napětí. Proto ji musíme řešit pomocí jiných zařízení, například regulace u distribučních transformátóřů. [11]

Parametry AT jsou v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3 Parametry autotransfómátóřů

U_{rTA} , kV	U_{rTB} , kV	U_{rTC} , kV	S_{rTAB} , MVA	S_{rTBC} , MVA	S_{rTAC} , MVA	U_{RrAB} , %	U_{RrAC} , %	U_{RrBC} , %
230	121	10,5	200	100	100	0,156	0,28	0,31
u_{krAB} , %	u_{krAC} , %	u_{krBC} , %	P_{krTAB} , kW	P_{krTAC} , kW	P_{krTBC} , kW	Spojeni	I_0 , %	P_0 , kW
11	16	10	312	280	310	Y0Y0D	0,09	45

Transformátor je instalován na rozvodně 2 i slouží pro transformace elektřiny pro konečného spotřebitele. Parametry transformátóřu jsou v tabulce 3.4

Tabulka 3.4 Parametry transformátoru

S_{nr} , MVA	U_{vn} , kV	U_{nn} , kV	ΔP_x , kW	R_t , Ω	X_t , Ω	ΔQ_x , kvar
40	115	10,5	50	1,46	38,4	260

3.1.3 Popis venkovních vedení

Vzhledem k tomu, že v odběru S3 nejsou důležité spotřebiče, můžeme je zásobovat jedním vedením. Zbytek spotřebičů obsahuje spotřebiče I skupiny spolehlivosti, a proto musí být napájeny minimálně ze 2 stran. To řešíme pomocí paralelních vedení.

Volbu průřezu provádíme s ohledem na další omezení [12]:

- 1) Zatížení vodičů. Proud, tekoucí vedením nesmí překročit maximální dovolený proud.
- 2) Ztráty korunou. Kvůli těmto ztrátám musíme omezit minimální průřez podle jmenovitého napětí:

110 kV – 70 mm²

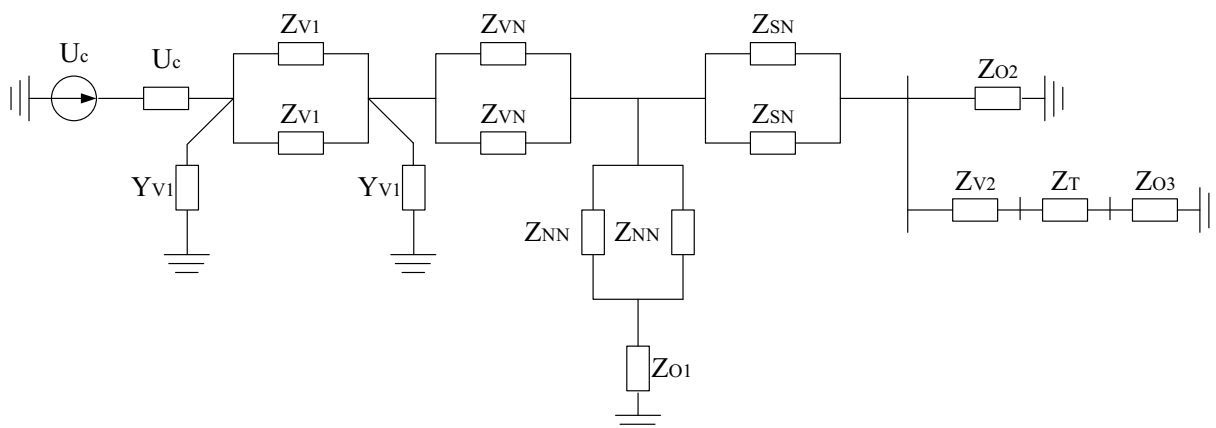
220 kV – 240 mm²

Tabulka 3.5 Parametry venkovních vedení

Vedení	I_{max} , A	L, km	r_1 , Ohm/km	x_1 , Ohm/km	b_1 , $\mu S/km$	r_0 , Ohm/km	x_0 , Ohm/km	b_0 , $\mu S/km$
V1	755	40	0,063	0,429	2,521	0,419	1,284	1,976
V2	999	25	0,067	0,389	2,979	0,333	1,945	2,979

3.2 Výpočet parametrů schématu.

Náhradní schéma sítě je na obrázku 3.2. Každý prvek schématu, znázorněného na obr. 3.1 je nahrazen impedancí Z, napájecí soustava je zadána zdrojem napětí U_c . U vedení 220 kV je nutně také vypočítat příčné parametry, které se zadávají pomocí vodivosti Y. Všechny parametry ve schématu jsou zadány v poměrných hodnotách, vztažených ke jmenovitému napětí napájecí soustavy.



Obrázek 3.2 Náhradní schéma navržené sítě

Výpočet provádíme v jmenovitých a poměrných hodnotách. Volíme vztažné napětí a výkon:

$$U_V = 220 \text{ kV}; \quad S_V = 1000 \text{ MVA}$$

Z toho můžeme vypočítat vztažný proud a vztažnou impedanci:

Vztažný proud:

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 2,6 \text{ (kA)};$$

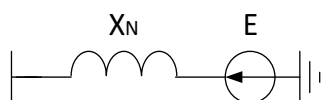
Vztažná impedance:

$$Z_V = \frac{U_V^2}{S_V} = \frac{220^2}{1000} = 48,4 \text{ (}\Omega\text{)};$$

Každý z elementů sítě má své náhradní schéma. Jeho parametry jsou závislé na protekaicích výkonech, délkách a jiných parametrech.

Náhradní schéma napáječe.

Napájecí uzel spojuje část sítě s celou energetickou soustavou. Impedance napáječe má pouze induktivní charakter a je závislá na zkratovém výkonu v místě napájení. Náhradní schéma je na obrázku 3.3



Obrázek 3.3 Náhradní schéma napájecího uzlu

Napájecí uzel se nachází na hladině napětí 220 kV. Střední hodnota napětí pro tuto napět'ovou uroveň bude 230 kV. Střední jmenovité napětí je doporučeno využít pro výpočty parametrů náhradních reaktanci, aby se nevyskytl problém se změnou koeficientu transformace. [9].

Zkratový výkon v místě napájení [6]:

$$S_Z = \sqrt{3} \cdot U_{SR} \cdot I_{k3}'';$$

kde I_{k3}'' – trojfázový zkratový proud v místě připojení.

$$S_Z = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 20 = 7,96 \cdot 10^3 \text{ (MVA)};$$

Určíme hodnotu impedanci napájecího uzlu [6]:

$$Z_N^* = j \cdot C_V \cdot \frac{S_V}{S_Z} = j \cdot 1,05 \cdot \frac{1000}{7,96 \cdot 10^3} = j0,131;$$

Kde C_V – napětový součinitel:

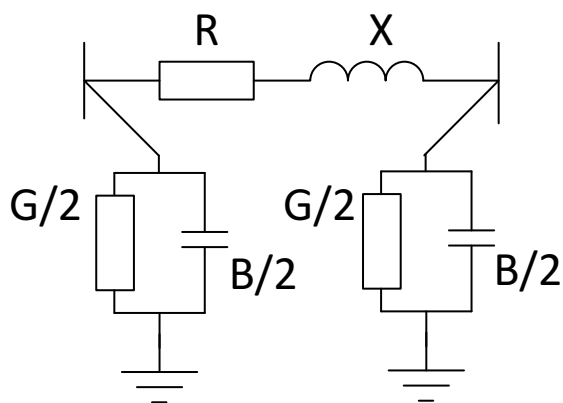
$$C_V = \frac{U_{SR}}{U_n} = \frac{230}{220} = 1,0454 \approx 1,05$$

V převodu na jmenovité hodnoty:

$$Z_N = Z_N^* \cdot Z_V = j0,131 \cdot 48,4 = j0,63 \Omega;$$

Náhradní schéma vedení.

Elektrické vedení má náhradní schéma typu Π , a obsahuje činný odpor, reaktance a vodivost. Náhradní schéma vedení je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Náhradní schéma vedení

Reaktance a činný odpor vypočítáme podle vztahů [9]:

$$R_V = R_K \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_{SR}^2}; \quad X_V = X_K \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_{SR}^2}$$

Vodivost se vypočítá podle vztahů [9]:

$$B_V = B_K \cdot l;$$

Vypočtené parametry vedení jsou v tabulce 3.6.

Tabulka 3.6 Náhradní parametry vedení

Vedení	R		X		B, μS
	Ω	-	Ω	-	
L ₁	2,52	0,052	17,2	L ₁	101
L ₂	1,68	0,035	9,73	L ₂	-

Pro vedení V1 taky vypočteme impedance mezí vedením a zemi:

Kapacitní reaktance [9]:

$$X_c = \frac{1}{B} = \frac{1}{2,017 \cdot 10^{-3}} = 496 \, \Omega;$$

V poměrných hodnotách:

$$X_c^* = \frac{X_c}{Z_B} = \frac{496}{48,4} = 10,1;$$

Svodový odpor [9]:

$$R_g = \frac{U^2}{\Delta P_k \cdot l} = \frac{220^2}{0,84 \cdot 40} = 1,44 \cdot 10^3 \Omega;$$

V poměrných hodnotách:

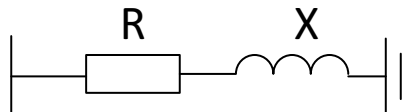
$$R_g^* = \frac{R_g}{Z_B} = \frac{1,44 \cdot 10^3}{48,4} = 29,5;$$

Kde ΔP_k – ztráty na korunu, při napětí 220 kV střední hodnota je 0,84 kW/km. [11]

Ztráty na korunu při jmenovitém napětí je příliš malé, a proto jejích zanedbáváme.

Parametry odběrů

Odběrová místa jsou na různých hladinách napětí a jsou určeny pomocí zadanych hodnot činného a jalového výkonu. V náhradní schématu můžeme zobrazit odběrová místa pomocí impedancí, jako na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Náhradní schéma odběru

Ve výpočtech je činná složka impedance vyšší než jalová, proto nemůžeme jí zanedbat.

Výsledná impedance se skládá z obou složek a může být vypočítaná podle vztahu [9]:

$$Z_o = \frac{U^2}{P^2 + Q^2} \cdot (P + jQ);$$

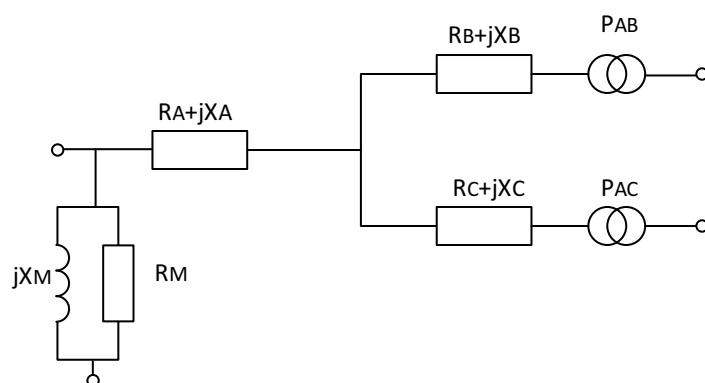
Vypočtené hodnoty jsou v tabulce 3.7

Tabulka 3.7 Náhradní parametry spotřeby

Odběrové místo	R		X	
	Ω		Ω	
1	27,1	0,06	8,3	0,2
2	130	0,8	42,8	0,9
3	3,6	0,03	1,2	0,007

Výpočet parametrů autotransformátorů.

U autotransformátoru existují vedle vazeb magnetických také vazby elektrické, což odvození matematického modelu značně komplikuje. Autotransformátor tvoří trafo, jehož jedno vinutí se připojí na napětí U a druhé vinutí se připojí do série tak, aby se jeho napětí přičítalo k napájecímu napětí U a aby jejich součet tvořil výsledné napětí U' . Budeme uvažovat snižovací autotransformátor s přepínáním odboček na nižším napětí. [7]



Obrázek 3.6 Náhradní schéma AT [7]

Výpočet činných odporů AT [9]:

$$R_A = \frac{U_{rTA}^2}{2} \cdot \left(\frac{P_{kAB}}{S_{rAB}^2} + \frac{P_{kAC} - P_{kBC}}{S_{rBC}^2} \right) = \frac{230^2}{2} \cdot \left(\frac{312 \cdot 10^{-3}}{200^2} + \frac{(280 - 310) \cdot 10^{-3}}{100^2} \right) = 0,13 \, \Omega,$$

$$R_B = \frac{U_{rTB}^2}{2} \cdot \left(\frac{P_{kAB}}{S_{AB}^2} + \frac{P_{kBC} - P_{kAC}}{S_{BC}^2} \right) = \frac{121^2}{2} \cdot \left(\frac{312 \cdot 10^{-3}}{200^2} + \frac{(310 - 280) \cdot 10^{-3}}{100^2} \right) = 0,08 \, \Omega,$$

$$R_C = \frac{U_{rTC}^2}{2} \cdot \left(-\frac{P_{kAB}}{S_{rAB}^2} + \frac{P_{kAC} + P_{kBC}}{S_{rBC}^2} \right) = \frac{10,5^2}{2} \cdot \left(-\frac{312 \cdot 10^{-3}}{200^2} + \frac{(280 + 310) \cdot 10^{-3}}{100^2} \right) = 2,8 \cdot 10^{-3} \, \Omega,$$

Výpočet impedance AT [9]:

$$Z_A = \frac{U_{rTA}^2}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{S_{rAB}} + \frac{u_{kAC} - u_{kBC}}{S_{rBC}} \right) = \frac{230^2}{2} \cdot \left(\frac{0,11}{200} + \frac{0,16 - 0,1}{100} \right) = 30,4 \, \Omega,$$

$$Z_B = \frac{U_{rTB}^2}{2} \cdot \left(\frac{u_{kAB}}{S_{rAB}} + \frac{u_{kBC} - u_{kAC}}{S_{rBC}} \right) = \frac{121^2}{2} \cdot \left(\frac{0,11}{200} + \frac{0,1 - 0,16}{100} \right) = -0,4 \, \Omega,$$

$$Z_C = \frac{U_{rTC}^2}{2} \cdot \left(-\frac{u_{kAB}}{S_{rAB}} + \frac{u_{kAC} + u_{kBC}}{S_{rBC}} \right) = \frac{10,5^2}{2} \cdot \left(-\frac{0,11}{200} + \frac{0,16 + 0,1}{100} \right) = 0,12 \, \Omega,$$

Reaktance AT [9]:

$$X_A = \sqrt{Z_A^2 - R_A^2} = \sqrt{30,5^2 - 0,13^2} = 30,5 \, \Omega,$$

$$X_B = -\sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = -\sqrt{0,4^2 - 0,08^2} = -0,39 \, \Omega,$$

$$X_C = \sqrt{Z_C^2 - R_C^2} = \sqrt{0,12^2 - (2,8 \cdot 10^{-3})^2} = 0,12 \, \Omega,$$

Parametry magnetického obvodu [9]:

$$R_0 = \frac{U_{rTA}^2}{P_0} = \frac{230^2}{45 \cdot 10^{-3}} = 3,5 \cdot 10^5 \, \Omega,$$

$$Z_M = \frac{U_{rTB}^2}{S_{BC} \cdot I_0} = \frac{230^2}{200 \cdot 0,005} = 2,9 \cdot 10^4 \, \Omega,$$

$$X_M = \sqrt{\frac{1}{Z_M^2} - \frac{1}{R_0^2}} = \sqrt{\frac{1}{(2,9 \cdot 10^4)^2} - \frac{1}{(3,5 \cdot 10^5)^2}} = 2,9 \cdot 10^4 \, \Omega,$$

Převody AT [9]:

$$t_1 = t_2 = t_3 = 1$$

$$P_{AB} = \frac{U_{rTA}}{U_{rTB}} = \frac{230}{121} = 1,9$$

$$P_{BC} = \frac{U_{rTC}}{U_{rTB}} = \frac{10,5}{121} = 0,09$$

Přepoččet na jmenovité hodnoty AT:

Vztažné impedance:

$$Z_{VA} = \frac{U_{rTA}^2}{S_V} = \frac{230^2}{1000} = 52,9 \, \Omega$$

$$Z_{VB} = \frac{U_{rTB}^2}{S_V} = \frac{121^2}{1000} = 14,6 \, \Omega$$

$$Z_{VC} = \frac{U_{rTC}^2}{S_V} = \frac{10,5^2}{1000} = 0,11 \, \Omega$$

Aplikací přepočítávacích vztahů obdržíme:

$$z_A = Z_A \cdot \frac{S_V}{U_{rTA}^2} = (0,13 + j30,5) \cdot \frac{1000}{230^2} = 2,6 \cdot 10^{-3} + j0,63$$

$$z_B = Z_B \cdot \frac{S_V}{U_{rTB}^2} = (0,08 - j0,4) \cdot \frac{1000}{121^2} = 6,5 \cdot 10^{-3} - j2,9 \cdot 10^{-2}$$

$$z_C = Z_C \cdot \frac{S_V}{U_{rTC}^2} = (2,8 \cdot 10^{-3} + j0,12) \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,028 + j1,2$$

$$z_M = Z_M \cdot \frac{S_V}{U_{rTA}^2} = (3,3 \cdot 10^5 + j2,9 \cdot 10^4) \cdot \frac{1000}{230^2} = 6,72 \cdot 10^3 + j608$$

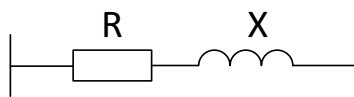
$$t'_1 = t_1 \cdot \frac{U_{rTA}}{U_{nA}} = 1 \cdot \frac{121}{110} = 1,1$$

$$p'_{AB} = p_{AB} \cdot \frac{U_{rTA}}{U_{rTB}} = 1,901 \cdot \frac{121}{230} = 1$$

$$p'_{BC} = p_{BC} \cdot \frac{U_{rTA}}{U_{rTC}} = 0,087 \cdot \frac{121}{10,5} = 1$$

Parametry dvojvinut'ového transformátoru.

Je obyčejný dvojvinut'ový transformátor s jednoduchou náhradní schématu. Reaktance je závislá na napětí nakrátko, a činný odpor – na ztrátách nakrátko. [10]



Obrázek 3.7 Náhradní schéma dvojvinut'ového transformátoru

Činný odpor [9]:

$$R = \Delta P \cdot \frac{S_V}{S_T^2} = 0,16 \cdot \frac{1000}{40^2} = 0,1;$$

Reaktance [9]:

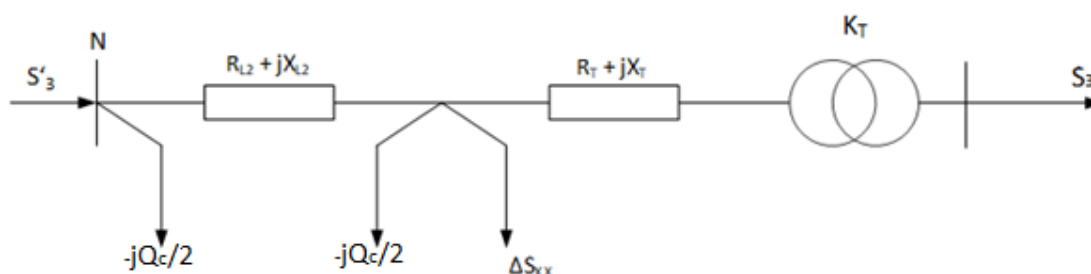
$$X = U_{K\%} \cdot \frac{S_V}{S_T} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,6;$$

4 VÝPOČET USTÁLENÉHO STAVU DANÉ SÍTĚ

4.1 Ruční výpočet ustáleného stavu dané sítě

Pro výpočet ustáleného stavu rozdělíme schéma na 2 úseky, každý z nich zahrnuje jednu trafostanici, napájenou vedením a odběry, vycházející z trafostanice. Výpočet začínáme od konce schématu na trafostanici 2, která má nejvyšší vzdálenost od napájecího uzlu.

Úsek 1-2 modeluje část schématu, zobrazený na obr. 3.1. Transformátor je modelován pomocí větve, která zahrnuje impedanci transformátoru, jeho transformační poměr a ztráty naprázdno. Vedení je nahrazeno impedancí, na začátku a konci jsou taky zadán nabíjecí výkon.



Obrázek 4.1 Náhradní schéma úseku 1-2

Výkon, odebíraný na stanici 2:

$$S_3 = 25 + j8,26 \text{ MVA};$$

Ztráty v transformátorů [12]:

$$\Delta S_{T2} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U^2} \cdot (R_T + jX_T) = \frac{25^2 + 8,26^2}{115^2} \cdot (1,46 + j38,4) = 0,08 + j2,01 \text{ MVA}$$

$$\Delta S_{xx} = 0,05 + j0,26 \text{ MVA}$$

Výkon, odebíraný na stanici 2, včetně ztrát v transformátorů:

$$S_{T2} = S_3 + \Delta S_{T2} + \Delta S_{xx} = 25 + j8,26 + 0,08 + j2,01 + 0,05 + j0,26 = 25,2 + j10,5 \text{ MVA}$$

Vedení V2

$$r_0 = 0,067 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x_0 = 0,389 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b_0 = 2,979 \cdot 10^{-6} \text{ S/km } l = 25 \text{ km}$$

Impedance a výkon vedení V2 [12]:

$$R_{V2} = r_0 \cdot l = 0,067 \cdot 25 = 1,7 \, \Omega,$$

$$X_{V2} = x_0 \cdot l = 0,389 \cdot 25 = 9,7 \, \Omega,$$

$$Q_{C2} = b_0 \cdot l \cdot U^2 = 2,979 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 110^2 = 0,9 \, \text{Mvar}$$

Proud, tekoucí vedením V2 [12]:

$$I_{V2} = \frac{S_{T2}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot n} = \frac{27,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 1} = 143 \, \text{A}$$

Podmínka $I_{V2} < I_{dov}$ je splněná.

Výkon na konci vedení V2 [12]:

$$S_{V2}^K = S_{T2} + \left(\frac{-jQ_{C2}}{2} \right) = 25,2 + j10,5 - \frac{j0,9}{2} = 25,2 + j10,1 \, \text{MVA}.$$

Ztráty vedením V2 [12]:

$$\Delta S_{V2} = \frac{P_{V2}^{K2} + Q_{V2}^{K2}}{U^2} \cdot (R_{V2} + jX_{V2}) = \frac{25,2^2 + 10,1^2}{110^2} \cdot (1,7 + j9,7) = 0,1 + j0,6 \, \text{MVA}$$

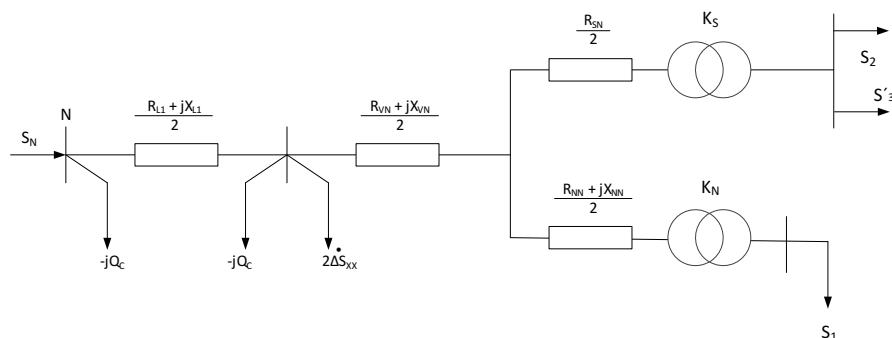
Výkon, tekoucí vedením včetně ztrát:

$$S_{V2}^Z = S_{V2}^K + \Delta S_{V2} = 25,2 + j10,1 + 0,1 + j0,6 = 25,3 + j10,7 \, \text{MVA}.$$

Výkon, tekoucí ze stanice 1 do stanice 2:

$$\dot{S}_{V2} = \dot{S}_{V2}^H + \left(\frac{-jQ_{C2}}{2} \right) = 25,3 + j10,7 + \frac{-j0,9}{2} = 25,3 + j10,2 \, \text{MVA}.$$

Úsek N-1 modeluje část schématu 220 kV, zobrazené na obr. 3.1. Autotransformátor je modelován třemi větvemi, které modelují každé z vinutí autotransformátoru a jsou spojené do třípaprskové hvězdy, transformačního poměru a ztrát naprázdno. Vedení je nahrazeno impedancí, na začátku a konci je taky zadán nabíjecí výkon. Předchozí úsek 1-2 je nahrazen odběrovým místem S'3.



Obrázek 4.2 Náhradní schéma úseku N-1

Výkon na straně 110 kV:

$$S_{1SN} = S_{V2} + S_2 = 25,3 + j10,2 + 84 + j27,6 = 109 + j37,9 \text{ MVA.}$$

Ztráty v autotransfátorech na straně 110 kV [12]:

$$\Delta S_{SN} = \frac{P_{SN}^2 + Q_{SN}^2}{U^2} \cdot \left(\frac{R_T}{2} + j \frac{X_T}{2} \right) = \frac{109^2 + 37,9^2}{230^2} \cdot \left(\frac{0,165}{2} + j \frac{0}{2} \right) = 0,02 \text{ MVA}$$

$$S'_{SN} = S_{SN} + \Delta S_{SN} = 109 + j37,9 + 0,02 = 109 + j37,9 \text{ MVA.}$$

Výkon na straně 10 kV:

$$S_{NN} = 10 + j3,3 \text{ MVA.}$$

Ztráty v autotransfátorech na straně 10 kV [12]:

$$\Delta S_{NN} = \frac{P_{NN}^2 + Q_{NN}^2}{U^2} \cdot \left(\frac{R_T}{2} + j \frac{X_T}{2} \right) = \frac{10^2 + 3,3^2}{230^2} \cdot \left(\frac{1,36}{2} + j \frac{54,2}{2} \right) = 0,001 + j0,06 \text{ MVA,}$$

$$S'_{NN} = S_{NN} + \Delta S_{NN} = 10 + j3,3 + 0,001 + j0,06 = 10 + j3,36 \text{ MVA.}$$

Výkon na straně 220 kV:

$$S'_{VN} = S'_{SN} + S'_{NN} = 109 + j37,9 + 10 + j3,36 = 119 + j41,2 \text{ MVA.}$$

Ztráty v autotransfátorech na straně 220 kV [12]:

$$\Delta S_{VN} = \frac{P_{VN}^2 + Q_{VN}^2}{U^2} \cdot \left(\frac{R_T}{2} + j \frac{X_T}{2} \right) = \frac{119^2 + 41,2^2}{230^2} \cdot \left(\frac{0,404}{2} + j \frac{30,4}{2} \right) = 0,06 + j4,6 \text{ MVA,}$$

Výkon trafostanici 1 včetně ztrát a autotransfátorech a ztrát naprázdno:

$$S_{AT} = S'_{VN} + \Delta S_{VN} + 2 \cdot \Delta S_{XX} = 119 + j41,3 + 0,06 + j4,6 + 2 \cdot (0,125 + j0,562) = 120 + j46,9 \text{ MVA}$$

Vedení V1

$$r_0 = 0,063 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad x_0 = 0,429 \text{ } \Omega/\text{km}; \quad b_0 = 2,521 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}; \quad l = 40 \text{ km}$$

Impedance a výkon vedení V1 [12]:

$$R_{V1} = r_0 \cdot l = 0,063 \cdot 40 = 2,5 \text{ } \Omega,$$

$$X_{V1} = x_0 \cdot l = 0,429 \cdot 40 = 17,2 \text{ } \Omega,$$

$$Q_{C1} = b_0 \cdot l \cdot U^2 = 2,521 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 220^2 = 4,9 \text{ Mvar}.$$

Proud, tekoucí vedením V1 [12]:

$$I_{V1} = \frac{S_{VN}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot n} = \frac{127 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 2} = 167 \text{ A}$$

Podmínka $I_{V1} < I_{dov}$ je splněná.

Výkon na konci vedení V1 [12]:

$$S_{V1}^K = S_{VN} + \left(\frac{-jQ_{C1}}{2} \right) = 120 + j46,9 - \frac{j4,9}{2} = 120 + j44,5 \text{ MVA}.$$

Ztráty vedením V1 [12]:

$$\Delta S_{V1} = \frac{P_{V1}^{K2} + Q_{V1}^{K2}}{U^2} \cdot \left(\frac{R_{V1}}{2} + j \frac{X_{V1}}{2} \right) = \frac{120^2 + 44,5^2}{220^2} \cdot \left(\frac{2,5}{2} + j \frac{17,2}{2} \right) = 0,8 + j5,8 \text{ MVA}$$

Výkon, tekoucí vedením včetně ztrát:

$$S_{V1}^Z = S_{V1}^K + \Delta S_{V1} = 120 + j44,5 + 0,8 + j5,8 = 121 + j50,2 \text{ MVA}.$$

Výkon, tekoucí ze stanice 1 do stanice 2 [12]:

$$S_N = S_{V1}^Z + \left(\frac{-jQ_{C1}}{2}\right) = 121 + j50,2 + \frac{-j4,9}{2} = 121 + j47,8 \text{ MVA.}$$

Výsledky výpočtu jsou v tabulce 4.1

Tabulka 4.1 Výsledky ručního výpočtu ustáleného stavu

S_N , MVA	121+j47,8
S_{V1} , MVA	59,8+j22,2
S_{V2} , MVA	25,1+j10,5
I_{V1} , A	167
I_{V2} , A	143

4.2 Výpočet ustáleného stavu v programu ENERGY UR

Model navržené sítě je třeba zadat pomocí 2 souboru – SPRAVOCHNIK.SPR a SIT.ENR.

SPRAVOCHNIK.SPR obsahuje seznam prvků, které byly použity. Existuje standartní soubor, ve kterém jsou umístěny nejčastěji používané druhy prvků sítě. Vzhledem k tomu, že tento soubor neobsahuje zařízení, používané v ČR, byl udělán vlastní seznam pro tenhle projekt.

Model vodičů v ENERGY

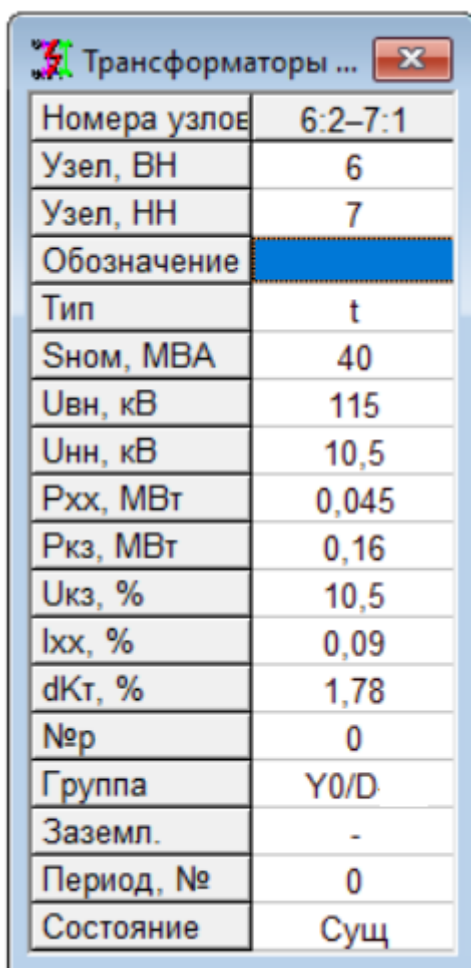
Náhradní parametry vodičů je určeny podle tabulek 3.5 a 3.6. Jejich vypočítané nebo zadané parametry jsou vloženy do souboru SPRAVOCHNIK.SPR a zobrazeny na obr. 4.3 [2]

Провода							
№	Марка провода	Мат. жилы	Fn кв.мм	Диаметр мм	Ro Ом/км	Idоп А	Код изделия
1	L110	Медь	120	14	0,067	999	851969
2	L220	Медь	240	21,6	0,0767	755	1048577

Obrázek 4.3 Zadaní parametrů vodičů v programu ENERGY [2]

Model dvojvinut'ového transformátoru

Dle tabulky 3.4 vyplňujeme model transformátoru T2. Tady uvádíme údaje o jmenovitém výkonu a napětí, ztrátách v transformátoru, způsobu regulace a spojení vinutí. Zadání modelu je na obr. 4.4 [2]



Номера узлов	6:2-7:1
Узел, ВН	6
Узел, НН	7
Обозначение	
Тип	t
Sном, МВА	40
Uвн, кВ	115
Uнн, кВ	10,5
Pxx, МВт	0,045
Pкз, МВт	0,16
Uкз, %	10,5
Ixx, %	0,09
dKт, %	1,78
№р	0
Группа	Y0/D
Заземл.	-
Период, №	0
Состояние	Сущ

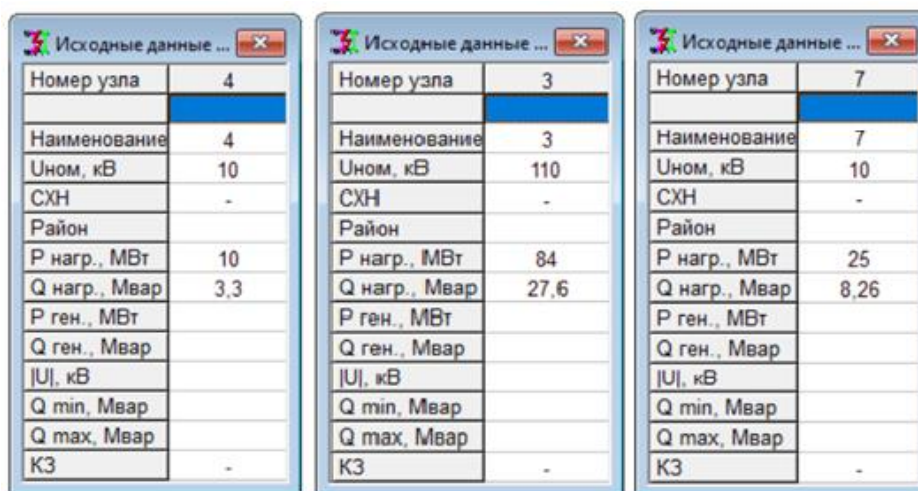
Obrázek 4.4 Zadání parametrů T2 v programu ENERGY

Náhradní model AT v ENERGY je podrobně popsán v b. 2.3.3. Zbytek parametrů lze zadat při vytváření celkového modelu sítě.

SIT.ENR slouží pouze k nakreslení schématu a následujícího výpočtu ustáleného stavu. Schéma je sestavené z typových prvků Energy UR, jejich vlastní charakteristiky jsou určeny pomocí souboru SPRAVOCHNIK.SPR.

Model odběrného místa v programu ENERGY

Odebíraný výkon zadáváme jako odebíraný výkon S_n , přímo v uzlech ve schématu. Zadání spotřeby je na obr. 4.5 Spojení spotřebičů je analogické se spojením vinutí transformátorů, do kterého napojíme zařízení. [2]



Номер узла	4
Наименование	4
Uном, кВ	10
СХН	-
Район	
P нагр., МВт	10
Q нагр., Мвар	3,3
P ген., МВт	
Q ген., Мвар	
U , кВ	
Q min, Мвар	
Q max, Мвар	
K3	-

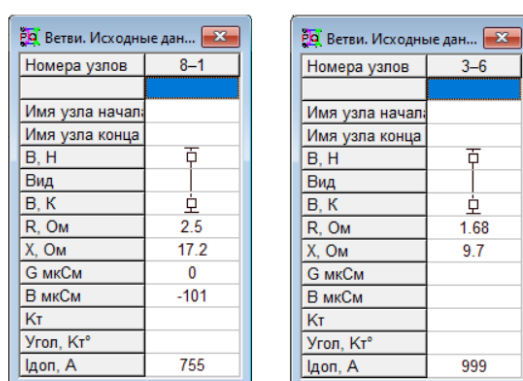
Номер узла	3
Наименование	3
Uном, кВ	110
СХН	-
Район	
P нагр., МВт	84
Q нагр., Мвар	27,6
P ген., МВт	
Q ген., Мвар	
U , кВ	
Q min, Мвар	
Q max, Мвар	
K3	-

Номер узла	7
Наименование	7
Uном, кВ	10
СХН	-
Район	
P нагр., МВт	25
Q нагр., Мвар	8,26
P ген., МВт	
Q ген., Мвар	
U , кВ	
Q min, Мвар	
Q max, Мвар	
K3	-

Образек 4.5 Zadání odběrných míst v programu ENERGY

Model vedení v ENERGY

Vedení se modelují pomocí doplňujících tabulek, kde lze vybrat typ vodičů a pak nastavit typ vedení, venkovní nebo kabelové, pak zadat délku, počet vodičů ve svazku a další. Zadávací tabulky jsou zobrazeny na obr. 4.6. [2]



Номера узлов	8-1
Имя узла начал	
Имя узла конца	
В, Н	<input type="checkbox"/>
Вид	
В, К	<input type="checkbox"/>
R, Ом	2.5
X, Ом	17.2
G мкСм	0
B мкСм	-101
Kт	
Угол, Кт°	
Iдоп, А	755

Номера узлов	3-6
Имя узла начал	
Имя узла конца	
В, Н	<input type="checkbox"/>
Вид	
В, К	<input type="checkbox"/>
R, Ом	1.68
X, Ом	9.7
G мкСм	
B мкСм	
Kт	
Угол, Кт°	
Iдоп, А	999

Образек 4.6 Modelování vedení v programu ENERGY

Model napájecí soustavy v ENERGY

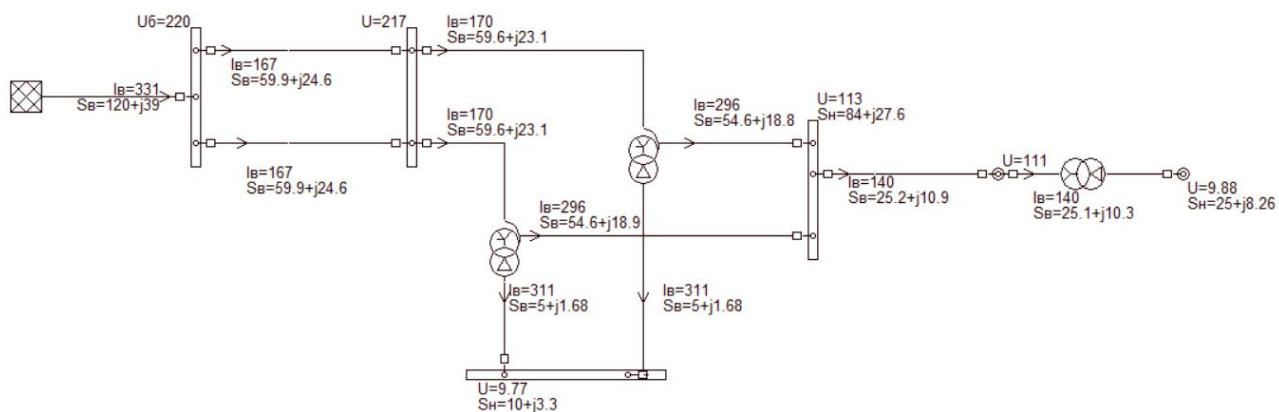
Напájecí soustava se zadává pomocí bloku „SISTEMA“. Zadání параметрů je zobrazeno на obr. 4.7. Do tabulky se zadává jmenovité napětí сítě а údaje о зкратовых протдеч, на jejích

základě program vypočítává ostatní parametry. Taky je možné zadat úhel napětí bilančního uzlu, když je to nutně, například pro výpočet stability síti. [2]

Номер узла	1-0
Узел подключения	1
Обозначение	
Цвет	
$ U_{бy} $, кВ	220
Угол, U°	0
$S_{к3}$, МВА	7621
$I_{к3}$, кА	20
$Ta3$, с	0,0318
$Ky3$	1,74
$Z1$, Ом	$0,632+j6,32$
$S_{к1}$, МВА	3811
$I_{к1}$, кА	10
$Z0$, Ом	$2,53+j25,3$
$Z2$, Ом	$0,632+j6,32$
Период, №	0
Состояние	Сущ

Obrázek 4.7 Zadaní parametrů napájecí soustavy v programu ENERGY

V síti je napětí regulováno odbočkami transformátorů. Výpočet ustáleného stavu je na obrázku 4.8



Obrázek 4.8 Výpočet ustáleného stavu v programu ENERGY UR

Tabulka 4.2 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu ENERGY UR

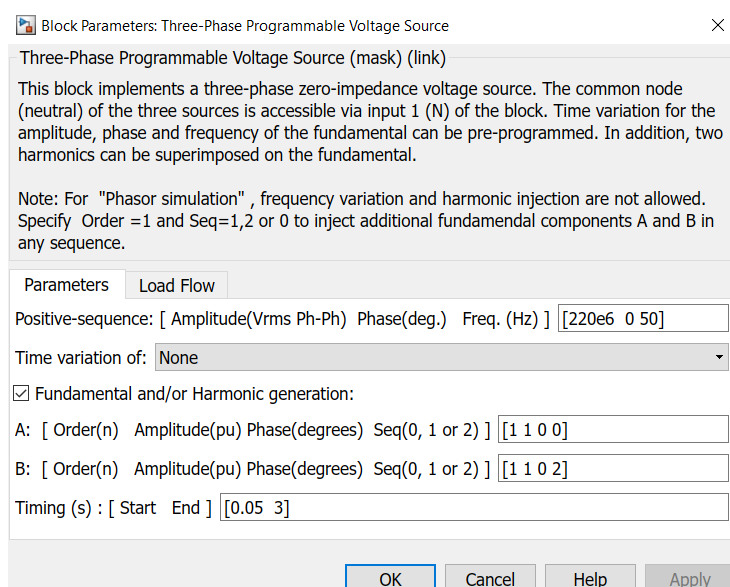
S_N , MVA	$120+j49$
S_{V1} , MVA	$59,9+j19,5$
S_{V2} , MVA	$25,2+j10,1$
I_{V1} , A	167
I_{V2} , A	140

4.3 Výpočet ustáleného stavu v programu SIMULINK

Náhradní schéma sítě je sestaveno z jednotlivých prvků vložené knihovny „Library Browser“, kde jsou všechny potřebné modely prvků soustavy nebo měřicích zařízení, které umožňují výpočty ustáleného stavu, zkratových proudů nebo jiných režimů.

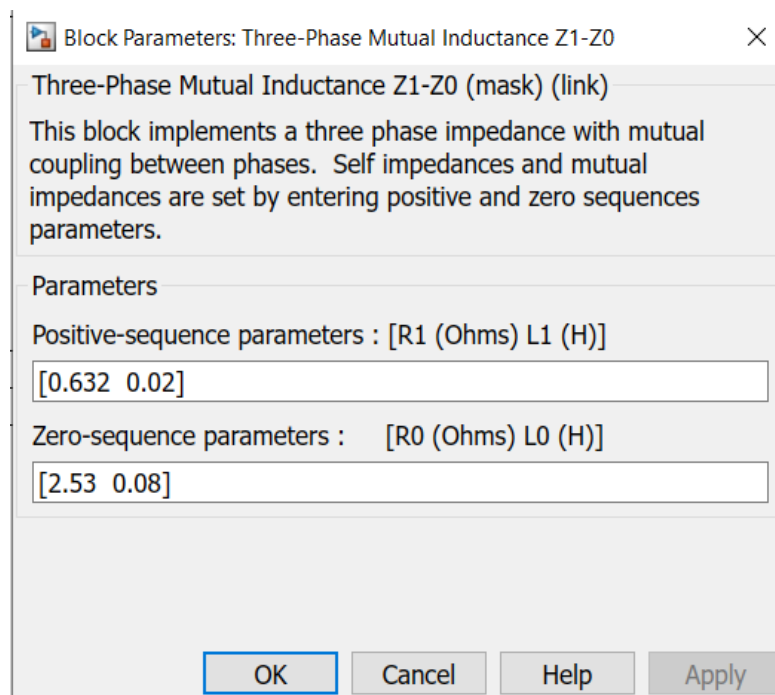
Model napájecí soustavy v programu SIMULINK

Napájecí soustava je dána pomocí prvku „3 – Phase Programmable Voltage Source“, který modeluje ideální třífázový zdroj napětí. V tomto bloku zadáváme hodnoty napětí napájecí soustavy a určíme výskyt zpětné i netočivé složky pro možnost modelování nesymetrických zkratů. Zadání parametrů je znázorněno na obr. 4.9 [1]



Obrázek 4.9 Zadání napětí napájecí soustavy v programu SIMULINK

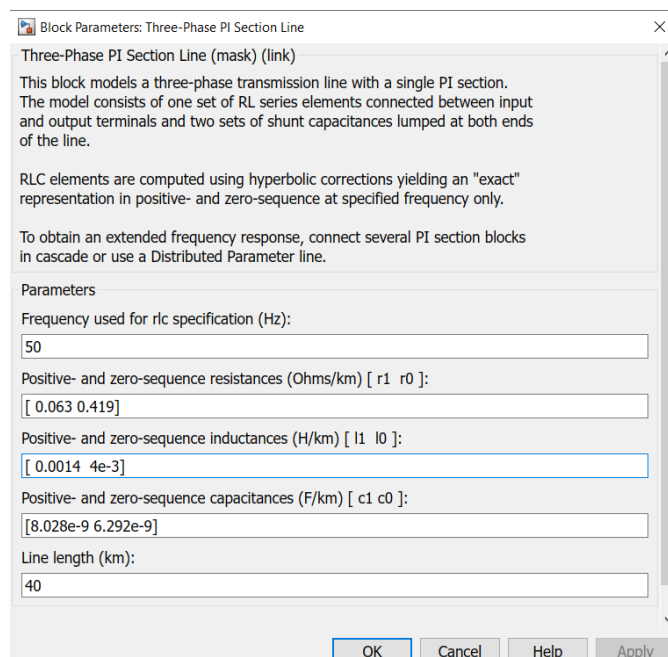
Impedance sítě lze zadat pomocí bloku „Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0“, který modeluje impedance sousledné a nulové složky. Impedance zpětné složky je stejná jako impedance sousledné složky. Zadání parametrů je zobrazeno na obr. 4.10 [1]



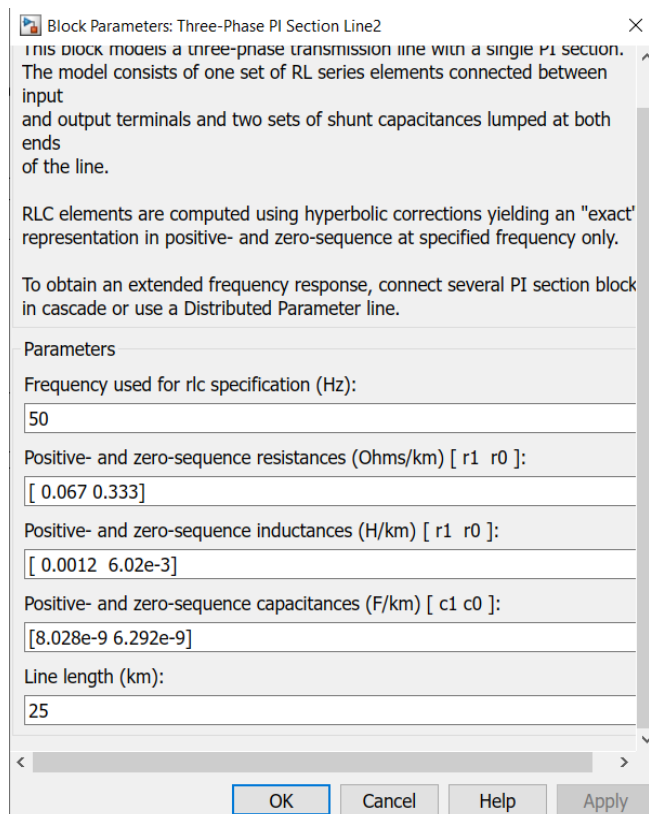
Obrázek 4.10 Zadaní impedance napájecí soustavy v programu SIMULINK

Model vedení v programu SIMULINK

Vedení jsou modelována prvkem „3 – Phase PI Section-line“, kde jsou modely vedení se soustředěnými parametry typu Π . Do těchto bloků jsou zadány parametry dle tabulky 3.3 a jejich znázornění je na obr. 4.11 – 4.12 [1]



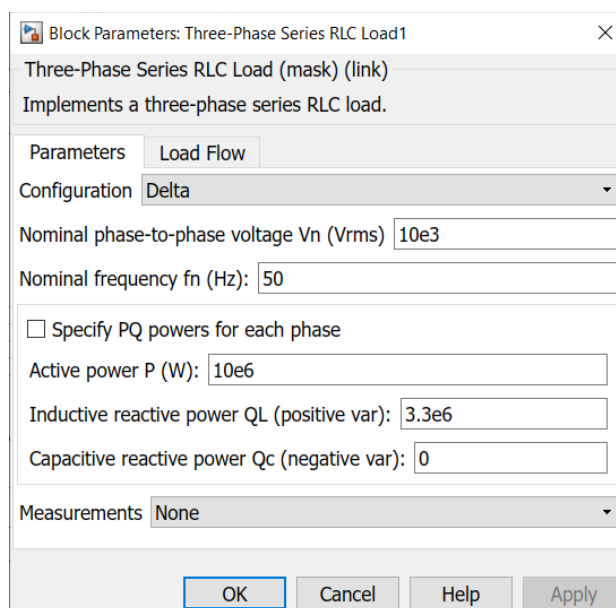
Obrázek 4.11 Zadaní parametrů vedení 220 kV v programu SIMULINK



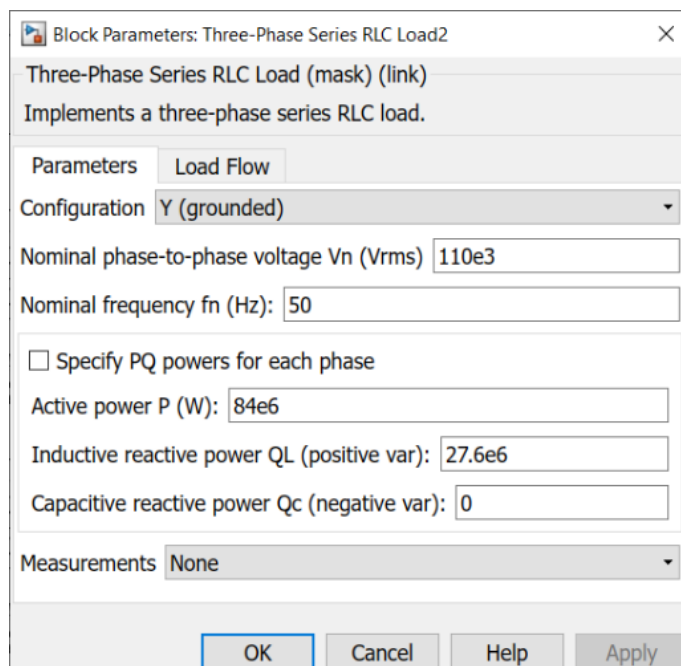
Obrázek 4.12 Zadaní parametrů vedení 110 kV v programu SIMULINK

Model zatížení v programu SIMULINK

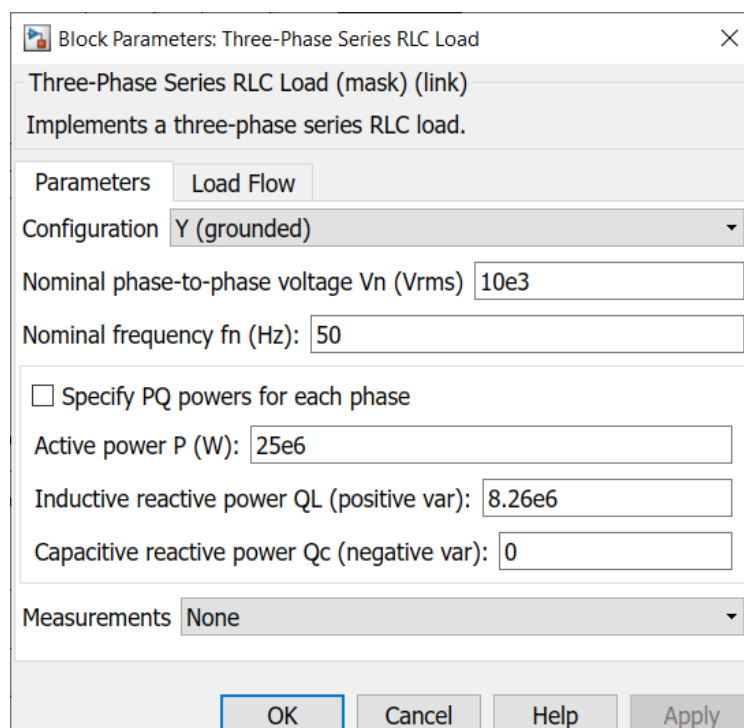
Každý ze tří odběrů, spojených do hvězdy nebo trojúhelníku, je dán pomocí bloků „3 – Phase Series RLC load“. Uvnitř bloku se zapisují frekvence, velikosti výkonů a typ spojení. Znázornění je na obr. 4.13-4.15 [1]



Obrázek 4.13 Zadávání parametrů odběrného místa 1 v programu SIMULINK



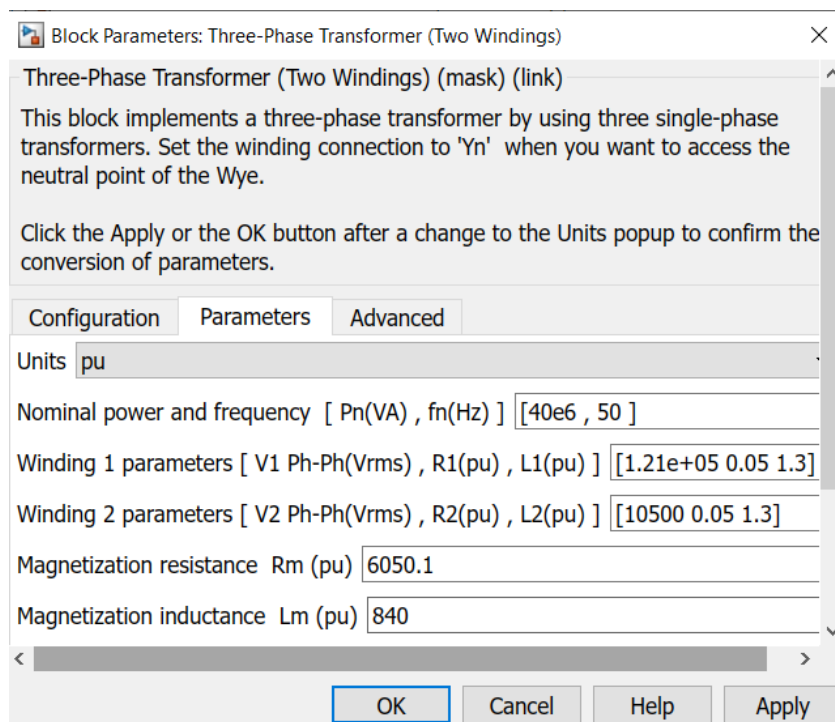
Obrázek 4.14 Zadávání parametrů odběrného místa 2 v programu SIMULINK



Obrázek 4.15 Zadávání parametrů odběrného místa 3 v programu SIMULINK

Model transformátoru v programu SIMULINK

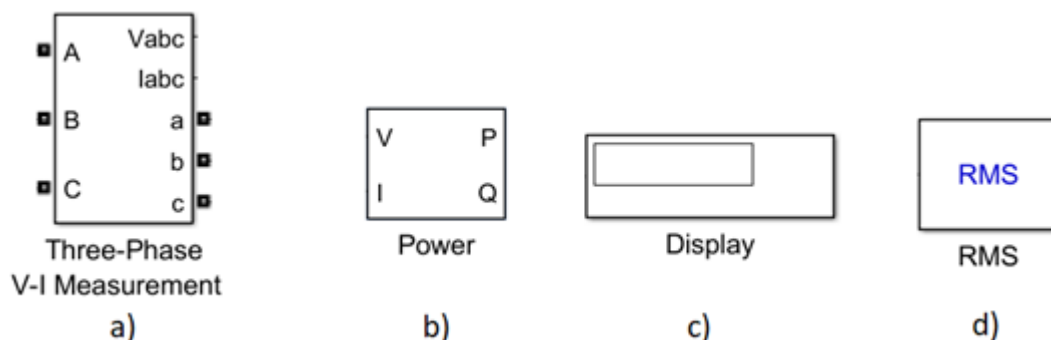
Dvojvinutový transformátor lze zadat pomocí bloku „Three-Phase Transformer (Two windings)“. [1] Nastavení bloku je na obr. 4.16



Obrázek 4.16 Zadávání parametrů dvojvinut'ového transformátoru v programu SIMULINK

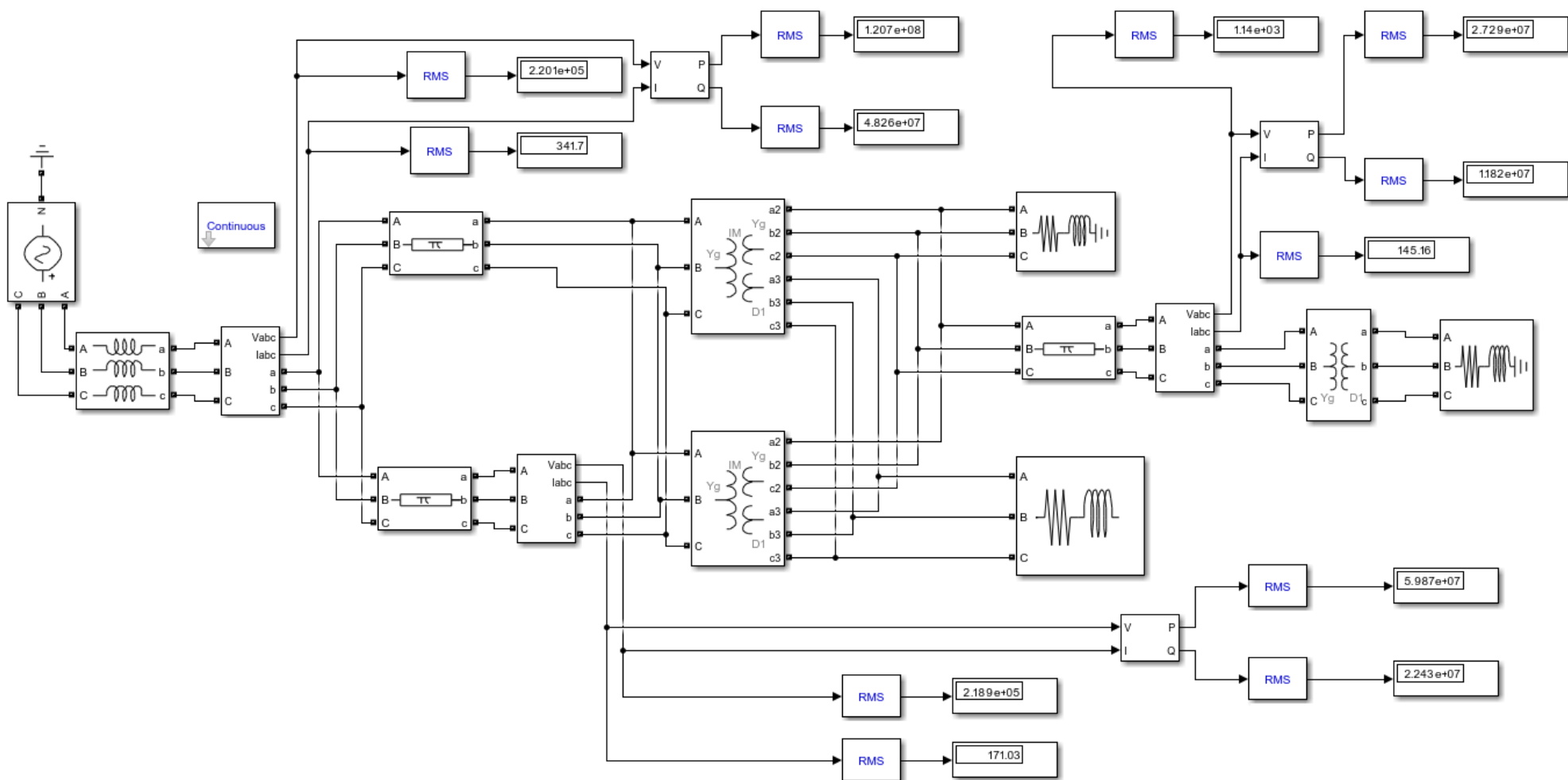
Modely měřících bloků v programu SIMULINK

Bloky měření jsou zadány pomocí třífázového měřicího zařízení „Multimetr“ (obr. 4.17, a), ze kterého získáváme hodnoty proudu a napětí. Výkony, tekoucí přes vedení je možné spočítat pomocí bloku „Power“ (obr. 4.17, b), na vstup dáváme velikosti proudu a napětí, které získáváme pomocí předchozího bloku. Aby program spočítal potřebné parametry v efektivních hodnotách, je nutné před oknem znázornění parametru (obr. 4.17, c) přidat ještě blok RMS, který přepočítává hodnoty parametrů na efektivní (obr. 4.17, d). [1]



Obrázek 4.17 Symbolické označení měřících bloků v programu SIMULINK

Celkové schéma a výpočet ustáleného stavu je na obr. 4.18. Všechny údaje jsou zadány pomocí oken zadávání parametrů dle vstupních údajů popsaných v bodě 3.1. Blok „powergui“ zadává typ výpočtu, v tomto případě – ustálený stav. [1]



Obrázek 4.18 Výpočet ustáleného stavu v programu SIMULINK

Výsledky výpočtu jsou v tabulce 4.3

Tabulka 4.3 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu SIMULINK

S_N , MVA	121+j48,3
S_{V1} , MVA	59,9+j22,4
S_{V2} , MVA	27,3+j11,8
I_{V1} , A	171
I_{V2} , A	145

4.3 Výpočet ustáleného stavu v programu EMTP-ATP

Pro výpočet ustáleného stavu v programu EMTP-ATP je nakresleno schéma v bloku ATPDraw, který slouží ke grafickému znázornění modelu. Pro modelování byly použity bloky knihovny EMTP-ATP, kteří jsou popsáné v [4].

Modely transformátorů v programu EMTP-ATP

Transformátory jsou určeny pomoci modelu TRIPLEX, kde jsou zadány všechny vlastní charakteristiky. Zadávání hodnot autotransformátorů je stručně popsáné v b. 2.3.1, transformátoru T2 – je na obr. 4.19 [4]

The screenshot shows the configuration window for a transformer model in EMTP-ATP. The 'Structure' section on the left includes dropdowns for 'Number of phases' (3), 'Number of windings' (2), and 'Type of core' (Triplex), along with a text field for 'Test frequency [Hz]' (50). Below these are radio buttons for 'Data based on' (Ind., Res., Cap., Core) and 'Test report' (Imp., Res., Cap., Core). The 'Ratings & connections' section on the right contains a table with columns 'Prim.' and 'Sec.' for 'L-L voltage [kV]', 'Power [MVA]', 'Connections', 'Phase shifts', and 'Node names'. The 'Data' section at the bottom has tabs for 'Inductance', 'Resistance', 'Capacitance', and 'Core'. A checkbox 'Zero sequence data available' is present. A table titled 'positive sequence' shows 'Imp. (%)', 'Pow. (MVA)', and 'Loss (kW)' for 'P-S' values of 11, 200, and 312 respectively. At the bottom, there are fields for 'Order', 'Label', and 'Comment', and buttons for 'OK', 'Cancel', 'Import', 'Export', 'Edit defin.', and 'Help'.

Obrázek 4.19 Zadání T2 v programu EMTP-ATP

Modely odběrových míst v programu EMTP-ATP

Spotřeba je nahrazena RLC-větví, ve spojení do hvězdy anebo trojúhelníku. [4] Tento prvek modeluje impedanční větev RLC, její náhradní parametry jsou zadány v tabulce 3.7. Zázornění parametrů je na obr. 4.20-4.22

Component: RLCD3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	27.1
L_1	Ohm	8.3
C_1	μF	0
R_2	Ohms	27.1
L_2	Ohm	8.3
C_2	μF	0
R_3	Ohms	27.1
L_3	Ohm	8.3

NODE	PHASE	NAME
IN	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 4.20 Zadání odběrového místa 1 v programu EMTP-ATP

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	130
L_1	Ohm	42.8
C_1	μF	0
R_2	Ohms	130
L_2	Ohm	42.8
C_2	μF	0
R_3	Ohms	130
L_3	Ohm	42.8

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0008
OUT1	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 4.21 Zadání odběrového místa 2 v programu EMTP-ATP

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	3.6
L_1	Ohm	1.2
C_1	μF	0
R_2	Ohms	3.6
L_2	Ohm	1.2
C_2	μF	0
R_3	Ohms	3.6
L_3	Ohm	1.2

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0010
OUT1	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No

☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 4.22 Zadaní odběrového místa 3 v programu EMTP-ATP

Model napájecí soustavy v programu EMTP-ATP

Napájecí soustava je představena ideálním zdrojem napětí, který je zobrazen na obr. 4.23

[4]

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	220000
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	X0001

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☐ Peak L-G ☐ RMS L-G ☒ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 4.23 Zadaní napájecí soustavy v programu EMTP-ATP

Impedance napájecí soustavy lze zadat pomocí bloku LINESY_3, který uvádí možnost zadat parametry sousledné a netočivé složky. Vzhledem k tomu, že uvnitř bloku lze zadat jenom parametry, vztažené na jednotku délky, uvádíme délku vodiče 1 m. [4] Zobrazení je na obr. 4.24

Component: LINESY_3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Ro	Ohm/m	2.53
Lo	Ohm/m	25.3
R+	Ohm/m	0.632
L+	Ohm/m	6.32

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0014
OUT1	ABC	X0002

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines Length 1 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 4.24 Zadání impedance napájecí soustavy v programu EMTP-ATP

Model vedení v programu EMTP-ATP

Vedení je realizováno pomocí prvku LCC Template, který realizuje Π -model vedení vysokého napětí. Do tohoto modelu lze zadat parametry vodičů, vybrat prvky a vybrat typ modelu, frekvence a jiné parametry [4]. Zobrazení prvků je na obr 4.25-4.26

Line/Cable Data: V110

Model Data Nodes

System type Name: V110 ☐ Template

Overhead Line ☐ HPh: 3

☐ Transposed ☐ Auto bundling ☐ Skin effect ☐ Segmented ground ☐ Real trans. matrix

Units ☒ Metric ☐ English

Model Type ☐ Bergeron ☒ PI ☐ JMarti ☐ Semlyen ☐ Noda

Data ☐ Printed output ☐ [C] print out

Comment: Order: 0 Label: ☐ Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Line/Cable Data: V110

Model Data Nodes

#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vlower [m]	Vmid [m]
1	1	0.429	0.7	0.067	6.6	24.5	24.5
2	2	0.429	0.7	0.067	4.6	30	30
3	3	0.429	0.7	0.067	6.6	24.5	24.5

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Obrázek 4.25 Zadání parametrů vedení 110 kV v programu EMTP-ATP

Line/Cable Data: V220

Model Data Nodes

System type Name: V220 ☐ Template

Overhead Line ☐ HPh: 3

☐ Transposed ☐ Auto bundling ☐ Skin effect ☐ Segmented ground ☐ Real trans. matrix

Units ☒ Metric ☐ English

Model Type ☐ Bergeron ☒ PI ☐ JMarti ☐ Semlyen ☐ Noda

Data ☐ Printed output ☐ [C] print out

Comment: Order: 0 Label: ☐ Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Line/Cable Data: V220

Model Data Nodes

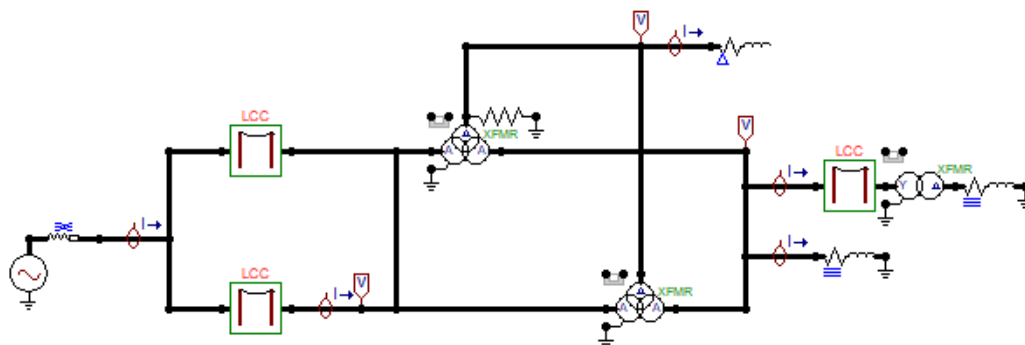
#	Ph.no.	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vlower [m]	Vmid [m]
1	1	0.429	1.08	0.063	6.6	24.5	24.5
2	2	0.429	1.08	0.063	4.6	30	30
3	3	0.429	1.08	0.063	6.6	24.5	24.5

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Obrázek 4.26 Zadání parametrů vedení 220 kV v programu EMTP-ATP

Sestavené schéma je na obr. 4.27



Obrázek 4.27 Výpočet ustáleného stavu v programu EMTP-ATP

Výsledky výpočtu jsou v tabulce 4.4

Tabulka 4.4 Výsledky výpočtu ustáleného stavu v programu EMTP-ATP

S_N , MVA	120+j46,3
S_{V1} , MVA	59,9+j21,5
S_{V2} , MVA	27,5+j12,8
I_{V1} , A	171
I_{V2} , A	126

Porovnání výsledků je v tabulce 4.5

Tabulka 4.5 Porovnání výpočtů ustáleného stavu ve vybraných programech

	Ruční výpočet	ENERGY UR	SIMULINK	EMTP-ATP
S_N , MVA	121+j47,8	120+j49	121+j48,3	120+j46,3
S_{V1} , MVA	59,8+j22,2	59,9+j19,5	59,9+j22,3	59,9+j21,5
S_{V2} , MVA	25,1+j10,5	25,2+j10,1	27,3+j11,8	27,5+j12,8
I_{V1} , A	167	167	171	170
I_{V2} , A	142	140	145	147

Jak jde vidět z výpočtů, vteklá ze zdroje do sítě cca 120,5+j48 MVA. Odchytky ve výpočtech jsou dány tím, že napájecí soustavu v ENERGY a SIMULINK je nutné představovat si jako reálné zdroje, ale v ATP a při ručním výpočtu ji nahradíme ideálním zdrojem. Odchytky v modelech prvků každého z programů jsou způsobené technickými omezeními vybraných softwarů.

5. VÝPOČET ZKRATŮ

Zkrat je zapojení elektrického zdroje bez spotřebiče, neboli stav, kdy v elektrickém obvodu neprochází elektrický proud přes spotřebič, ale přímo od jednoho pólu zdroje k druhému. [6]

Při zkratu je elektrickému proudu kladen velmi malý odpor, takže velikost proudu může být vysoká a ve vodiči může vznikat velké teplo. Procházející proud je v tomto případě určen pouze vnitřní impedancí zdroje a vodičů. [6]

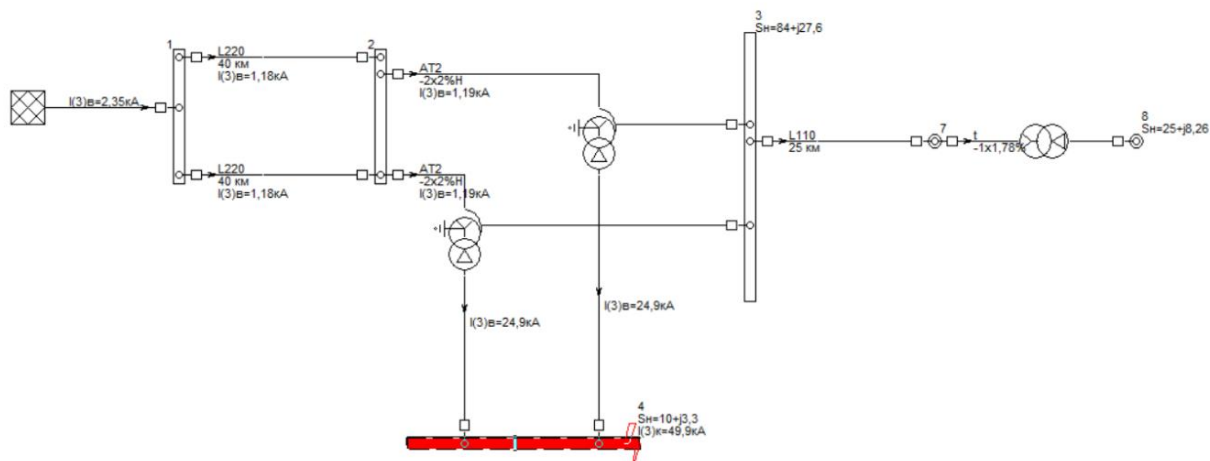
V silnoproudé elektrotechnice a energetice představují zkraty mimořádně nebezpečné poruchy. Zde hraje roli i mimořádně vysoká úroveň zkratových proudů, způsobující vývin velkého množství tepla v místě krátkého spojení. To může vést k požárům či výbuchům vybavení. Dalším nebezpečným důsledkem vysokých zkratových proudů je elektrodynamické namáhání vodičů a zařízení. V jeho důsledku může dojít k deformacím vinutí elektrických strojů, poškození vodičů a přípojníc rozvoden či mechanickým rozrušením konstrukce. [6]

Zkraty představují velká ohrožení pro drahé zařízení, proto tohle zařízení je vždy chráněné proudovými či jinými ochranami. Zkratové proudy se počítají nejen pro nastavení elektrických ochran, ale především pro návrh elektrických zařízení z hlediska jejich zkratové odolnosti. Pro zkratovou odolnost jsou určující předpokládané maximální zkratové proudy, pro nastavení ochran, dle jejich funkce – maximální i minimální zkratové proudy. [6]

Pro sestavení modelu sítě budeme řešit 3 druhy různých zkratů – třífázový zkrat na straně 10 kV, třífázový a jednofázový zkrat na straně 110 kV. Výpočty těchto zkratů budou provedeny pomocí softwarů ENERGY TKZ, EMTP-ATP a SIMULINK.

5.1 Výpočet zkratů pomocí softwaru ENERGY TKZ

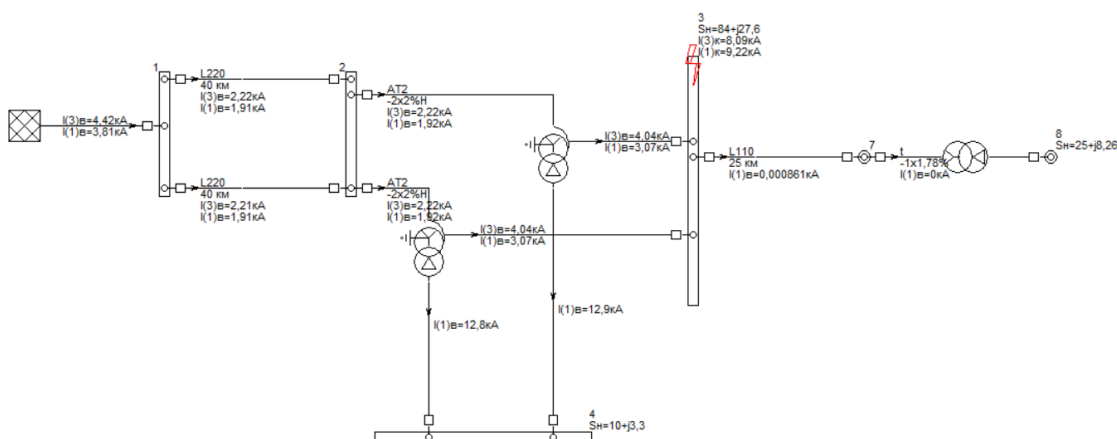
Schéma pro výpočet uvedených zkratů je identické se schématem, uvedeném na obr. 4.8. Základní model bloku TKZ je identický s jinými bloky programu ENERGY a liší se tím, že určen pouze pro výpočty zkratů, a parametrů, s nimi souvisejícími. Výpočet zkratu na straně nižšího napětí je uveden na obr. 5.1



Obrázek 5.1 Výpočet třífázového zkratu na straně TV v programu ENERGY CS

Z obr. 5.1 je vidět, že proud při třífázovém zkratu v tomto místě se rovná 49,9 kA.

Výpočet zkratů na straně středního napětí je uveden na obr. 5.2

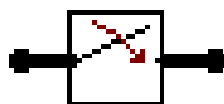


Obrázek 5.2 Výpočet zkratů na straně LV v programu ENERGY CS

Z obr. 5.2 je vidět, že proud při třífázovém zkratu v tomto místě se rovná 8,09 kA, při jednofázovém – 9,22 kA.

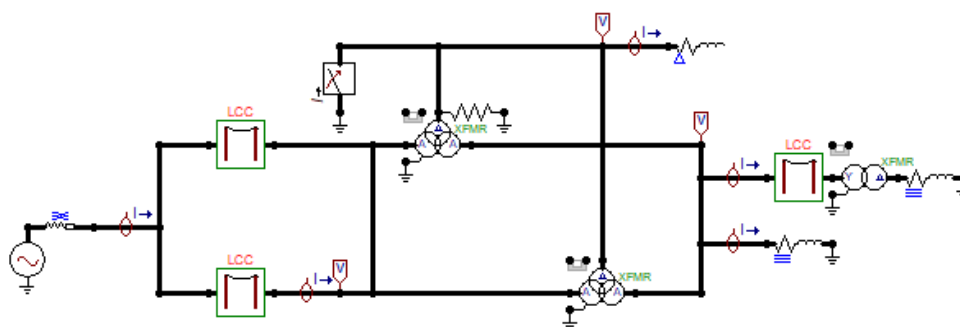
5.2 Výpočet zkratů pomoci softwaru EMTP-ATP

V programu EMTP-ATP zkrat lze zadat pomocí prvku „Switch time controlled“ – Časově řízený spínač. V dialogovém okně se určí okamžik sepnutí spínače T-cl, okamžik rozepnutí spínače T-op zadávaný v sekundách. Při zapojení tohoto prvku byl vybrán typ měření – měření proudů, tekoucích prvky sítě. [3]



Obrázek 5.3 Blok pro modulace třířázového zkratu v programu EMTP-ATP

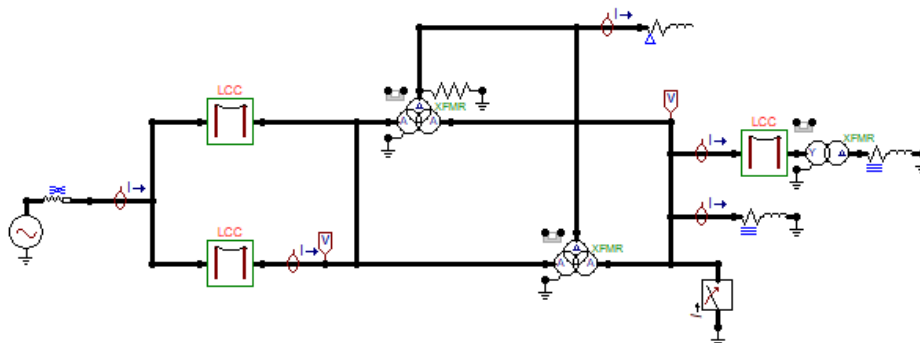
Schéma pro výpočet zkratu na straně 10 kV je na obrázku 5.4



Obrázek 5.4 Výpočet třířázového zkratu na straně TV v programu EMTP-ATP

Z LIS-souboru zjistíme, že proud při třířázovém zkratu v tomto místě se rovná 49,9 kA.

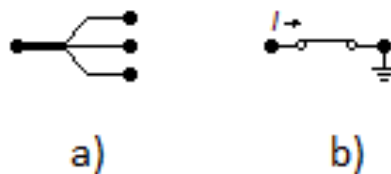
Výpočet třířázového zkratu na straně středního napětí je uveden na obr. 5.5



Obrázek 5.5 Výpočet třířázového zkratu na straně LV v programu EMTP-ATP

Z LIS-souboru zjistíme, že proud při třířázovém zkratu v tomto místě se rovná 8,05 kA.

Jednofázový zkrat lze namodelovat pomocí prvku „Splitter“, který umožňuje přechod z třířázového prvku do třech jednofázových a naopak. Na jednu z fází zapojíme spínač, který modeluje spojení nakrátko. [3]



Obrázek 5.6 Použité bloky pro simulaci jednofázového zkratu v programu EMTP-ATP

Vzhledem k tomu, že při jednofázovém zkratu u vedení se vyskytuje netočivá složka, je nutné zadat ji pomocí bloku LINESY_3 stejným způsobem, jako impedance zdrojů. [3] Zadání parametrů je na obr. 5.7-5.8

Component: LINESY_3

DATA	UNIT	VALUE
R ₀	Ohm/m	0.419
L ₀	Ohm/m	1.284
R ₊	Ohm/m	0.063
L ₊	Ohm/m	0.429

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0018
OUT1	ABC	X0003

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines
Length 40 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 5.7 Zadání parametrů vedení V1 pro souslednou a netočivou soustavu

Component: LINESY_3

DATA	UNIT	VALUE
R ₀	Ohm/m	0.333
L ₀	Ohm/m	1.945
R ₊	Ohm/m	0.067
L ₊	Ohm/m	0.389

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0008
OUT1	ABC	X0010

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

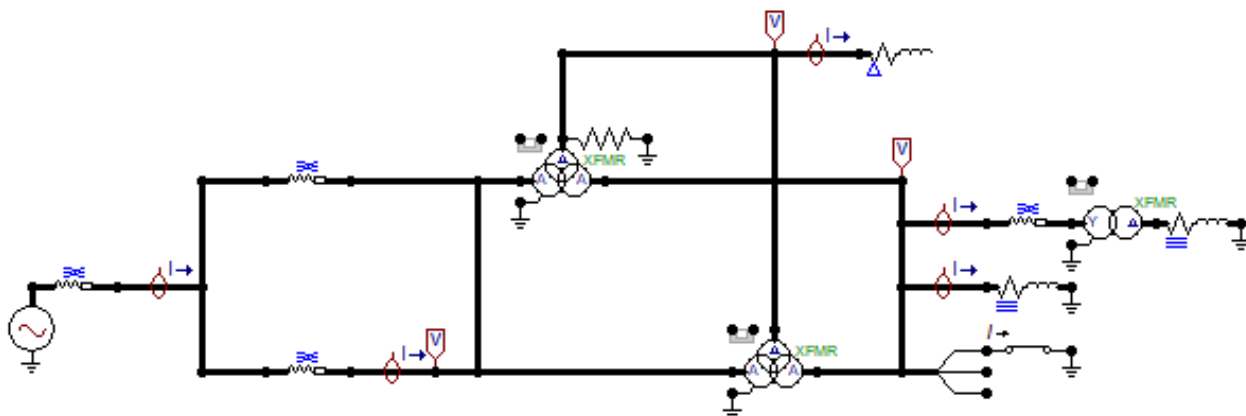
Comment:

Lines
Length 25 [m] ☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Obrázek 5.8 Zadání parametrů vedení V2 pro souslednou a netočivou soustavu

Schéma je znázorněna na obrázku 5.9

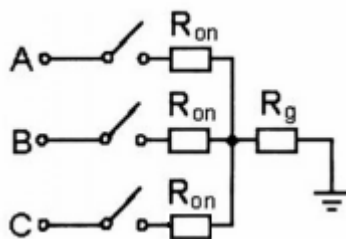


Obrázek 5.9 Výpočet jednofázového zkratu na straně LV v programu EMTP-ATP

Z LIS-souboru zjistíme, že proud při jednofázovém zkratu v tomto místě se rovná 9,2 kA.

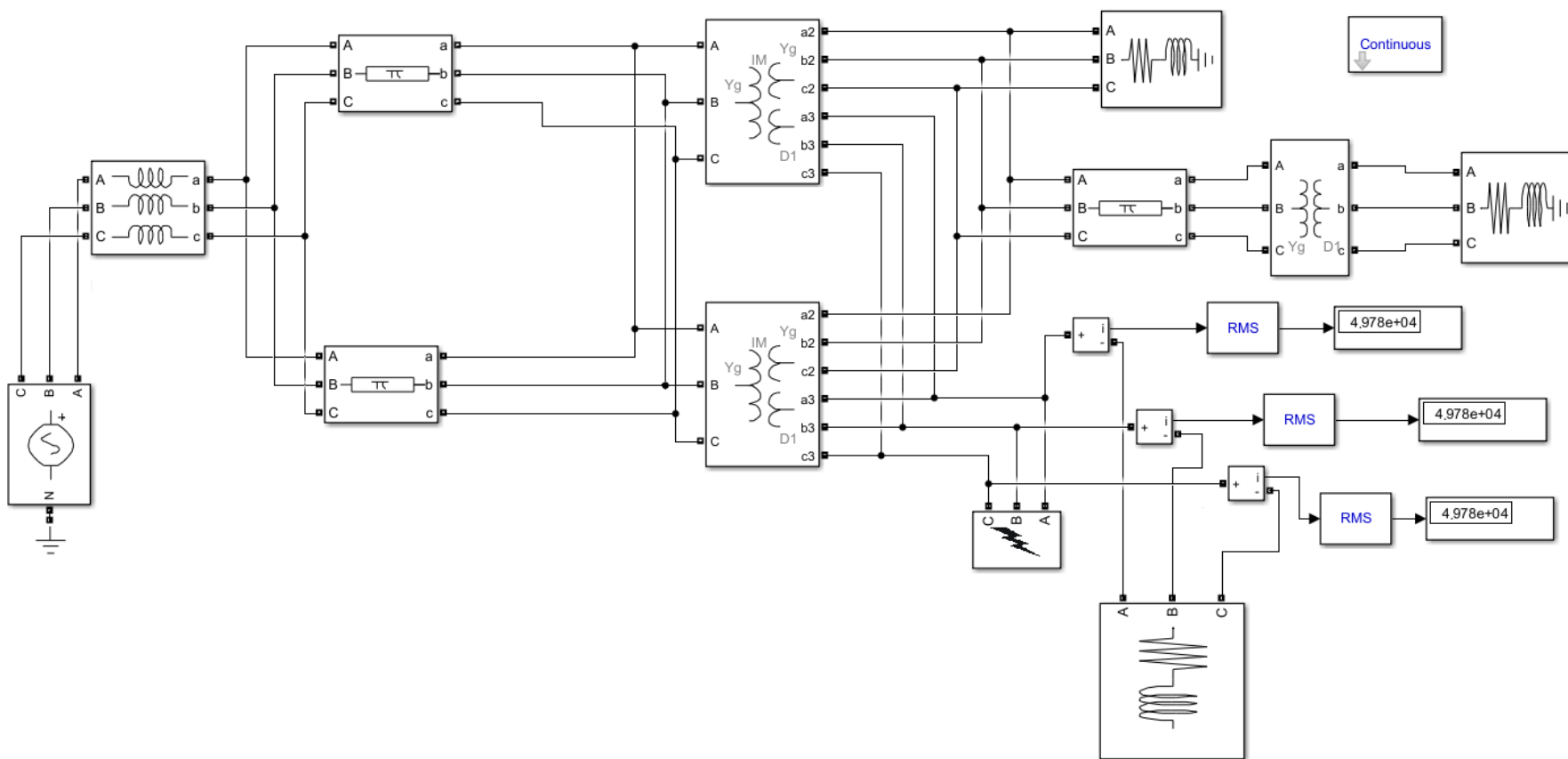
5.3 Výpočet zkratů pomocí softwaru SIMULINK

V programu SIMULINK lze zadat zkrat pomocí prvku „3 – Phase-Fault“, který modeluje zkraty v třífázové soustavě. Model prvku je na obr. 5.10 [1]

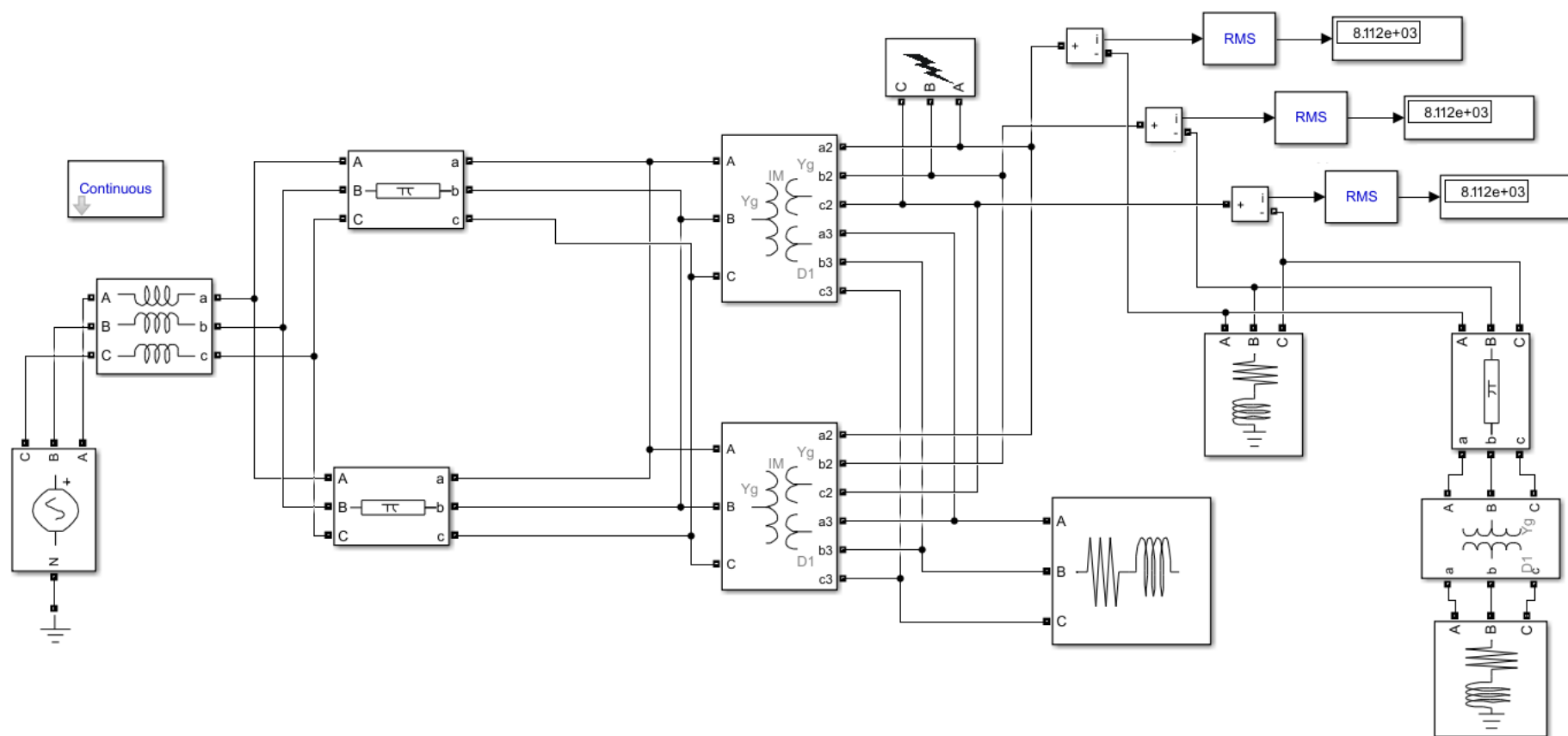


Obrázek 5.10 Model prvku „3 – Phase-Fault“ v programu SIMULINK [1]

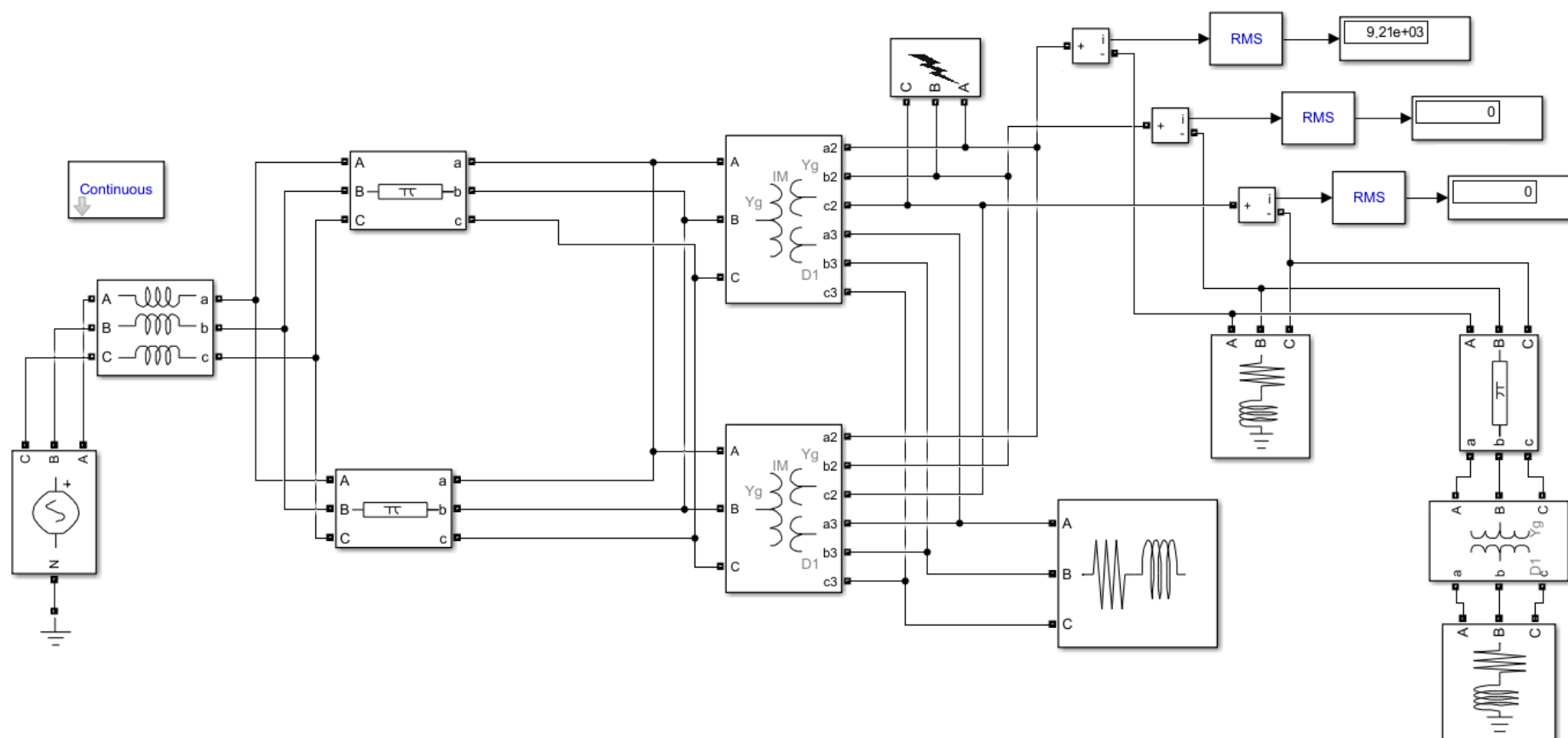
Prvek se zapojuje do schématu v místě zkratu, přičemž uvnitř volíme zapojení fází do země. K prvku „3 – Phase-Fault,, se připojují prvky „current measurement“, kteří ukazují velikost proudu v každé fázi. Výpočty zkratových proudů jsou uvedeny na obr 5.11-5.13



Obrázek 5.11 Výpočet třífázového zkratu na straně TV v programu SIMULINK



Obrázek 5.12 Výpočet třífázového zkratu na straně LV v programu SIMULINK



Obrázek 5.13 Výpočet jednofázového zkratu na straně LV v programu SIMULINK

Z obrázků 5.11-8.13 zjistíme velikostí proudů:

$$I_{K3}(10) = 49,8 \text{ kA}$$

$$I_{K3}(110) = 8,1 \text{ kA}$$

$$I_{K1}(110) = 9,2 \text{ kA}$$

Výsledky výpočtu porovnáme v tabulce 5.1

Tabulka 5.1 Výsledky výpočtu zkratových proudů ve vybraných programech

Zkrat	ENERGY TKZ	EMTP-ATP	SIMULINK
$I_{K3}(10)$, kA	49,9	49,9	49,8
$I_{K3}(110)$, kA	8,09	8,05	8,1
$I_{K1}(110)$, kA	9,22	9,2	9,2

Z tabulky 5.1 je vidět, že nejvyšších hodnot dosahují zkratové proudy při třífázovém zkratu na přípojnici 10 kV. Na přípojnici 110 kV nastává nejvyšší proud při jednofázovém zkratu.

ZÁVĚR

V první části této práce jsou popsány autotransformátory. Nejprve zde jsou popsány vlastnosti autotransformátorů, a hlavně jejich rozdělení, zda se jedná o typu magnetického obvodu, či umístění odbočkových závitů. K typům magnetického obvodu patří obvody, kteří jsou sestavené ze 3, 5 či 7 magnetických sloupky. Tento rozdíl se vyskytuje hlavně při modelování stavu naprázdno, ale neprojevuje se při výpočtech ustálených stavů při zatíženém AT anebo zkratech.

V další části jsem uvedl matematický model AT, který je vhodný k praktickému použití. Spojení všech vinutí do tří paprskové hvězdy je jednou z nejlepších variant pro výpočty náhradních impedancí, při jmenovitém nastavení odbočkových závitů. Při těchto výpočtech je možné zanedbat zbytečné množství dat, které mohou být neposkytnuty provozovatelem. Taky, je popsáno modelování autotransformátorů pomocí softwarů. Uvádím tady 3 modely, kteří odpovídají stanovenému modelu AT v softwarů, které se používají v různých zemích. Jak jde vidět z výsledků měření, odchylky při výpočtech v různých programech jsou minimální a nachází se v dovolených mezích. Rozdíl ve výsledků může být způsoben tím, že v některých programech, například MATLAB, je model popsán podrobněji než v ENERGY UR, kde je možné zanedbat nějaké parametry z důvodu technických omezení programu. Výsledky měření odpovídají reálným výsledkům měření, které byly pro danou DP poskytnuty společností ČEPS. Z toho důvodu je možné tvrdit, že při správném nastavení modelů umožňují softwary provádět podobné měření bez zbytečných nákladů a také zrychlit proces těchto měření. Také, použití softwaru umožňuje provedení experimentu, které nelze provést pomocí fyzikálních modelu z hlediska finančních či jiných důvodu anebo namodelovat provozní režim sítě ještě před stavbou, vyloučí těmito všichni nepřesnosti, které mohou nastat při napájení do soustavy.

Na závěr je dán příklad výpočtů různých režimů navržené sítě. Byl namodelován ustálený stav, který odpovídá provoznímu stavu této sítě, a pak vypočtené hodnoty zkratových proudů na straně nižšího napětí a přípojnic 110 kV. Odchylky ve výsledcích výpočtů v různých programech jsou způsobeny vyšší uvedenými důvody.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHERNYCH I.V. 2014. Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i SIMULINK. Moskva. 288 s. IBSN: 978-5-97060-080-1
- [2] KULEŠOV. A.I. 2011 Programmnyi kompleks „EnergyCS TKZ” (Raschety tokov korotkych zamykanij v slozhnykh elektricheskikh setyach). Rukovodstvo polzovatelya. Ivanovo. 189 s.
- [3] DR. W. SCOTT MEYER, DR. TSU-HUEI LIU 2015. Alternative Transients Program (ATP) Rule Book. West Linn, Oregon. p.913
- [4] L. PRINKLER, H. K. HOIDALEN. 2009. ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista. Users’ Manual. Trondheim. p. 270
- [5] PERELMUTER V. 2013 Electrotechnical Systems. Simulation with Simulink and SimPowerSystems. New York, p. 432 ISBN: 978-1-4665-1403-4
- [6] IEC 60909-0 – *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Calculation of currents* ENG-2001
- [7] ALEXANDER S. SHLIAPNIKOV, ANATOLIY G. 2018 Lavrov Mathematical Autotransformer Modelling in Technical Means of Education and Modern Education Technology. Sankt-Petersburg. p 4
- [8] JUN KANG, LIJUN FU 2012 Three-Phase Transformer Models for Load Flow Calculations in Power Systems. Wuhan. p. 4
- [9] GOLOV V.P. Přednášky z předmětu: Elektromagnetické přechodové jevy v elektrizačních soustavách, 3 ročník, letní semestr. Ivanovo State Power University – 2017.
- [10] VOLDEK A.I., POPOV V.V. 2010. Elektricheskiye mashiny: uchebnik dlya vuzov. Sankt Peterburg. 350 s. ISBN 978-5-469-01381-5
- [11] <https://leg.co.ua/transformatory/praktika/nedostatki-avtotransformatorov.html>
- [12] A.E. ARZHANNIKOVA, T.U. MINGALEVA. 2014. Projektirovanie elekticheskoy seti. Ivanovo. 121 s.
- [13] S.A.ULJANOV. 1970. Elektromagnitnye perehodnye processy v elektricheskikh sistemakh. Uchebnik dlya elektrotehnicheskikh VUZov i fakultetov. Moskva. 520 s.
- [14] ČSN IES 60076-8 Výkonové transformátory – pokyny pro použití.
- [15] PHDR. R. WAGNER. 1999. Rusko-český technický slovník. Ostrava. 1102 s. ISBN 80-85780-96-8